

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

**Jednotka pro měření a přenos environmentálních
dat s využitím LPWAN**

**The Environmental Data Measuring Unit Based on
LPWAN**

2019

Bc. Michal Kufa

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Michal Kufa

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T003 Aplikovaná elektronika

Téma:

Jednotka pro měření a přenos enviromentálních dat s využitím LPWAN
The Environmental Data Measuring Unit Based on LPWAN

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši technologií pro LPWAN v IoT využívaných na území České republiky.
2. Navrhněte obvodové zapojení měřicí jednotky pro snímání teploty, vlhkosti, atmosférického tlaku, intenzity světla a koncentrace oxidu uhličitého.
3. Dále navrhněte komunikační protokol na aplikační úrovni v síti LoRaWAN.
4. Realizujte prototyp měřicí jednotky za použití desek plošných spojů.
5. Navrženou měřicí jednotku ověřte v reálných podmínkách.

Seznam doporučené odborné literatury:

ADRYAN, Boris, Dominik OBERMAIER a Paul FREMANTLE. The technical foundations of IoT. Norwood, MA: Artech House, 2017. Artech House mobile communications library. ISBN 163081251X.

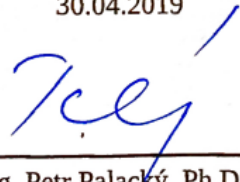
PAL, Arpan a Balamuralidhar PURUSHOTHAMAN. IoT technical challenges and solutions. Boston: Artech House, 2017. Artech House power engineering series. ISBN 1630811114.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Karel Witas, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



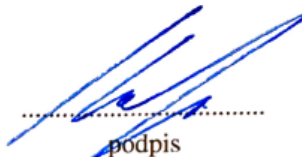


prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 29.4.2019



.....
podpis

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu Ing. Karlu Witasovi, Ph.D., za cenné rady, konzultace a připomínky k vytvoření mé diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá technologiemi internetu věcí a demonstrativní ukázkou tohoto rychle se rozrůstajícího odvětví elektroniky a komunikace. Cílem práce je shrnout a popsat technologie LPWAN používané na území České republiky a následně navrhnout a realizovat environmentální jednotku, pracující v síti LoRaWAN.

Úkolem jednotky je měřit a vyhodnocovat environmentální veličiny a ty dále distribuovat pomocí LoRaWAN infrastruktury na serverové úložiště, kde můžou být podrobeny následné analýze. V tomto případě jsou měřenými environmentálními veličinami teplota a vlhkost vzduchu, atmosférický tlak, intenzita světla, koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu a koncentrace těkavých látek ve vzduchu. V případě překročení bezpečných prahů hodnot jednotlivých veličin, je generována varovná zpráva.

Klíčová slova

IoT, LoRa, SigFox, NB-IOT, LPWAN, internet věcí, environmentální jednotka, senzor, měření, DPS, mikroprocesor

Abstract

This master's thesis is focused on technologies of the Internet of Things and also partly presentation of this fast growing electronic and telecommunication segment. The main goal of this work is providing of an overview and description of LPWAN technologies used in the Czech Republic. The thesis cover design and prototyping of an environmental unit, working in LoRaWAN network.

The main task of the designed device is measuring and evaluating environmental values and next their distribution via LoRaWAN infrastructure to server storage, where can be analysed. The measured values in this scenario are air temperature, relative humidity, atmosphere pressure, light intensity, CO₂ and volatile substances concentrated in the air. A alert message is invoked in the case of breaking secure treshold of single values.

Klíčová slova

IoT, LoRa, SigFox, NB-IOT, LPWAN, internet of things, environmental unit, sensor, measuring, PCB, microprocessor

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	8
Seznam ilustrací.....	9
Seznam tabulek	10
Úvod	11
1. Technologie LPWAN	13
1.1 LoRa	14
1.2 Sigfox	17
1.3 NB – IoT	21
1.4 Srovnání technologií LPWAN.....	23
2. Environmentální jednotka a měřené veličiny	25
2.1 Měření teploty.....	25
2.2 Měření vlhkosti.....	26
2.3 Měření atmosférického tlaku	27
2.4 Měření oxidu uhličitého	28
2.5 Měření intenzity světla.....	28
3. Praktická realizace environmentální jednotky	30
3.1 Mikroprocesor	31
3.2 Senzor teploty a vlhkosti	32
3.3 Senzor tlaku	35
3.4 Senzor kvality vzduchu	37
3.5 Senzor intenzity světla	39
3.6 Senzor otřesu	41
3.7 Komunikační modul LoRa	43
3.8 Napájení jednotky	45
3.9 Celkové schéma zapojení	46
3.10 Deska plošných spojů	47
3.11 Firmware	49
3.12 Odesílané data	50
3. Testování jednotky v reálných podmínkách.....	52
3.1 Tvar přijaté zprávy	53
3.2 Určení naměřených hodnot	54

3.3 Měření v reálných podmínkách.....	54
3.3.1 Lokalita – Praha	54
3.3.2 Lokalita – Obříství.....	56
3.3.3 Lokalita – Český Těšín.....	57
3.3.4 Lokalita – Vysoké Mýto	58
Závěr.....	60
Literatura.....	61
Přílohy	64

Seznam použitých symbolů a zkratek

A/D	Analogově/Digitální
AES	Advanced Encryption Standard
ADR	Adaptive Data Rate
CO ₂	Oxid uhličitý
CMOS	Complementary Metal–Oxide Semiconductor
ČRa	České Radiokomunikace
ČR	Česká Republika
DSL	Digital Subscriber Line
DPS	Deska plošných spojů
GSM	Groupe Spécial Mobile
I ² C	Inter-Integrated Circuit
IoT	Internet of Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
LED	Light Emitting Diode
LoRa	Long Range
LPWAN	Low Power Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
NAK	Network Authentication Key
MAC	Message Authentication Code
SDR	Software Define Radio
SF	Spread Factor
SIM	Subscriber Identity Module
SPI	Serial Peripheral Interface
TVOC	Total Volatile Organic Compounds
UART	Universal asynchronous receiver / transmitter
UNB	Ultra Narrow Band
UTC	Universal Coordinated Time
VOC	Total Volatile Organic Compounds

Seznam ilustrací

Obrázek 1 : Struktura sítě pro IoT [1]	13
Obrázek 2 : Logo LoRa	14
Obrázek 3 : Pokrytí sítě LoRaWAN v ČR [4]	14
Obrázek 4 : Princip sítě LoRaWAN [2]	15
Obrázek 5 : Logo Sigfox	17
Obrázek 6 : Mapa pokrytí ČR technologií Sigfox [7]	18
Obrázek 7 : Struktura sítě sigfox [8]	19
Obrázek 8 : Frekvenční spektrum komunikace Sigfox [8]	19
Obrázek 9 : Frekvency hopping [8]	20
Obrázek 10 : Mapa pokrytí NB-IoT operátorem Vodafone [11]	21
Obrázek 11 : Princip sítě NB-IoT [12]	22
Obrázek 12 : Možnosti využití spektra NB-IoT [9]	23
Obrázek 13 : Základní blokové schéma jednotky	30
Obrázek 14 : Detailní blokové schéma jednotky	31
Obrázek 15 : Vnitřní blokové schéma mikropočítače MSP430F5438A [24]	32
Obrázek 16 : Senzor SHT21 [25]	32
Obrázek 17 : Závislost tolerance při měření vlhkosti [25]	33
Obrázek 18 : Závislost tolerance při měření teploty [25]	34
Obrázek 19 : Doporučené schéma zapojení	34
Obrázek 20 : Senzor BMP280 [26]	35
Obrázek 21 : Závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce [27]	35
Obrázek 22 : Blokové schéma senzoru BMP208 [26]	36
Obrázek 23 : Doporučené schéma zapojení pro I ² C [26]	37
Obrázek 24 : Modul Air quality 2 click [29]	38
Obrázek 25 : Schéma zapojení Air quality 2 click [29]	38
Obrázek 26 : Schéma zapojení pro řízení napájení senzoru CO ₂	39
Obrázek 27 : Vnitřní schéma zapojení BH1603 [30]	40
Obrázek 28 : Schéma zapojení snímače BH1603 v realizované jednotce	41
Obrázek 29 : Blokové schéma senzoru ADXL363 [31]	42
Obrázek 30 : Schéma zapojení obvodu ADXL v realizované jednotce	43
Obrázek 31 : Modul RN2483 [32]	43
Obrázek 32 : Blokové schéma modulu RN2683 [32]	44
Obrázek 33 : Schéma zapojení RN2483 v jednotce	45
Obrázek 34 : Schéma zapojení napěťového regulátoru LE33C	46
Obrázek 35 : 3D model osazené DPS (strana TOP)	47
Obrázek 36 : 3D model osazené DPS (strana BOTTOM)	47
Obrázek 37: Simulace návrhu VF vedení	48
Obrázek 38 : Přizpůsobené VF vedení na DPS	48
Obrázek 39 : Vývojový diagram hlavního programu	49
Obrázek 40 : Číslování bajtů odesílaných dat	50
Obrázek 41 : ALARM bajt	50
Obrázek 42 : Testovaný prototyp	52
Obrázek 43 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnových stanic na mapě (1. lokalita)	55
Obrázek 44 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnové stanice na mapě (2. lokalita)	56

Obrázek 45 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnových stanic na mapě (3. lokalita)	58
Obrázek 46 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnových stanic na mapě (4. lokalita)	59

Seznam tabulek

Tabulka 1: Přehled vybraných parametrů LPWAN technologií	24
Tabulka 2 : Vliv oxidu uhličitého na člověka [18]	37
Tabulka 3 : Nastavení citlivosti snímače BH1603 [30]	40

Úvod

Internet věcí označovaný často zkratkou IoT z anglického výrazu Internet of Things, je prudce se rozvíjející odvětví informačních technologií, jehož hlavním cílem je připojení mnoha zařízení do jednotné sítě, což umožní centralizovaný vzdálený dohled nad zařízeními. Obliba IoT roste jak z důvodu neustále se rozšiřujícího bezdrátového pokrytí, tak i z důvodu dostupnosti relativně levných elektronických komponent k tomu potřebných.

Prakticky vzato je IoT zařízení vše co je připojeno k síti a je možno s ním komunikovat bez přímého fyzického kontaktu v místě jeho umístění. Využití IoT lze hledat prakticky všude. Ať už je to průmysl, kde umožňuje poměrně efektivně udržovat kontrolu nad jednotlivými stroji, zařízeními, ale také například nad stavem nápojového automatu v kantýně. Mimochodem první inteligentní zařízení připojené do internetu, byl nápojový automat. Uplatnění však není pouze v průmyslu, ale také v domácnosti, například inteligentní pračka, či celá inteligentní domácnost se již stává vcelku běžnou součástí našich životů. IoT zařízení také nachází uplatnění v oblastech životního prostředí, kde dlouhodobě snímají a zaznamenávají kvalitu ovzduší, četnost srážek, stavy hladiny vodních nádrží a tím mohou pomoci k minimalizaci škod způsobených živelnými pohromami.

Informačních technologií, které se řadí do kategorie IoT, je mnoho. Některá zařízení vyžadují neustálé připojení do sítě a naopak některá se připojují do sítě pouze v pravidelných intervalech, či při překročení prahu snímaných mezních hodnot. Zařízení se také liší ve směru komunikace. Existují zařízení, která mají pouze jednosměrný kanál komunikace, tzn., pouze odesílají data, ale existují také zařízení, které jsou schopna kromě odesílání i data přijímat, a tím například upravovat svou činnost na základě vnějších požadavků. Další důležitou směrnicí pro výběr použité síťové technologie pro připojení zařízení je velikost dat, které budou mezi zařízeními přenášena

Z výše uvedeného textu vyplývá, že existuje opravdu široká škála IoT zařízení, avšak hlavním rozdílem jednotlivých technologií je způsob jejich připojení do celé infrastruktury. První skupinou jsou zařízení, která jsou do sítě pevně připojena vedením, zatímco druhou skupinu tvoří zařízení, která jsou bezdrátová. Především bezdrátová zařízení nachází největší uplatnění v místech, kde není možné zřídit pevnou konektivitu a zdroj trvalého napájení. Bezdrátové sítě se dále člení podle maximální dosažitelné vysílací vzdálenosti. Zařízení, která jsou schopna pracovat na vzdálenosti několika kilometrů a navíc umožňují nízkoeenergetický provoz, tedy provoz z baterií, jsou označovány LPWAN (Low Power Wide-Area Network).

V první části diplomové práce jsou podrobněji popsány vlastnosti jednotlivých LPWAN technologií, které jsou v České republice dostupné. Na území České republiky jsou provozovány 3 největší komerční technologické sítě, které se řadí do kategorie LPWAN. Konkrétně se jedná o technologie LoRaWAN, Sigfox a NarrowBand-IoT.

Druhá část práce se již zabývá samotným návrhem a realizací měřicí jednotky. Měřicí jednotka pracuje v síti LoRaWAN a do serverového úložiště v pravidelných intervalech exportuje aktuální naměřené hodnoty teploty, vlhkosti, tlaku, intenzity světla a koncentrace CO₂ ve vzduchu. Kromě původního zadání je jednotka dále doplněna o funkci detekování výskytu těkavých látek v ovzduší a akcelerometrem, která primárně slouží jako bezpečnostní senzor indikující cizí zacházení s

jednotkou. Z důvodu zachování myšlenky IoT zařízení a konkrétně myšlenky mobility zařízení je celá jednotka napájena bateriově. Při dimenzování baterie je potřeba dbát i na okolní podmínky, respektive na teplotu ovzduší, ve kterém je zařízení provozováno, poněvadž kapacitu baterie významně snižují nízké teploty. Realizovaná jednotka je dimenzována na minimálně 3 měsíce nepřetržitého provozu.

V poslední části práce je ověřena funkčnost celého řešení v reálných podmínkách, a to v různých částech republiky.

1. Technologie LPWAN

Základní požadavek na technologii LPWAN již plyne z jejího názvu. Low Power Wide-Area Network, volným překladem se jedná tedy o nízkoenergetickou síť pro rozsáhlé území. U zařízení využívajících tuto technologii je předpokládán bateriový provoz a to v řádu minimálně několika let. Dobu provozu ovlivňuje také skutečnost, jak často zařízení komunikuje se sítí. V případech, kdy dochází ke komunikaci pouze párkrát za měsíc (typicky odečet hodnoty vodoměru, elektroměru, plynoměru), může být životnost baterie v zařízení až 10 let.

Z důvodů velkého pokrytí a relativně husté, neustále se rozšiřující infrastruktury základnových stanic, je možné využít tuto technologii například také k určení aktuální polohy vysílače. K určení co nejpřesnější polohy zařízení je potřeba, aby na zařízení „vidělo“ co nejvíce základnových stanic. Výsledné určení polohy již probíhá za pomoci znalostí přesné lokace základnových stanic a dopočtu předpokládané lokace za pomoci principu trilaterace.

Princip činnosti a struktura sítě je znázorněna na obr. 1. IoT zařízení kromě snímačů a dalších doplňujících periférií obsahuje především komunikační modul, který odesílá data na nejbližší základnovou stanici a z té jsou data dále distribuovány na server (cloud). Data na serveru jsou pak již uživateli dostupná buďto prostřednictvím webových stránek, nebo prostřednictvím aplikací.



Obrázek 1 : Struktura sítě pro IoT [1]

1.1 LoRa

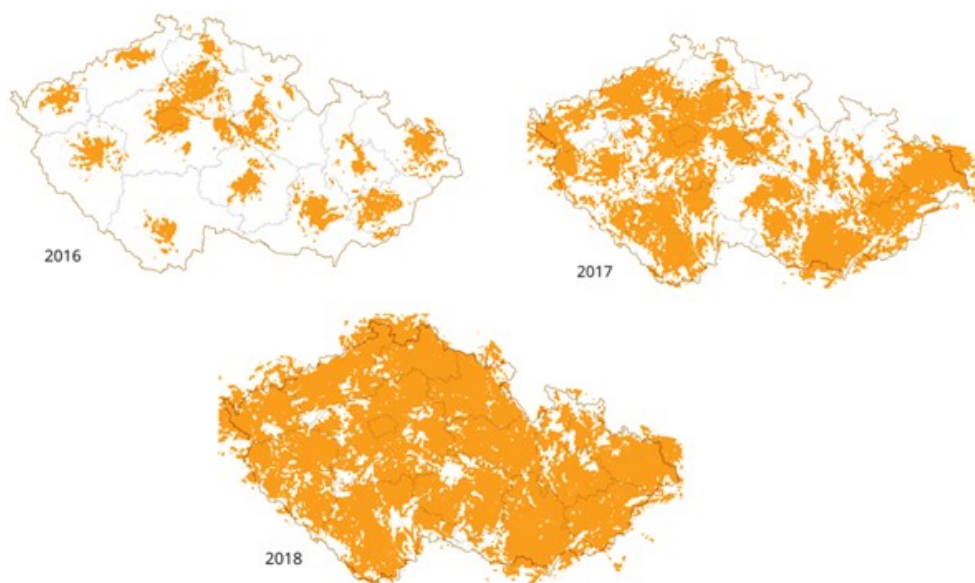


Obrázek 2 : Logo LoRa

LoRa (Long Range) modulace je založena na modulaci rozprostřeného spektra CSS (chirp spread spectrum), která umožňuje efektivní modulaci pro dosažení nízkého vysílacího výkonu. CSS modulace byla využívána ve vojenské a vesmírné komunikaci, díky vysoké odolnosti vůči úzkopásmovému rušení a možnosti dosažení velkých vzdáleností přenosu. LoRa je první nízkonákladovou implementací této technologie pro komerční využití. [2]

Lora Aliance je otevřené neziskové uskupení několika subjektů, které se spolupodílí na vytváření síťové infrastruktury LoRaWAN. Tato organizace se od svého založení v roce 2015 rozrostla na více než 500 členů a stala se nejrychleji rostoucí aliancí v technologickém sektoru. Členové aliance úzce spolupracují a sdílejí zkušenosti se zaváděním tohoto protokolu. LoRaWAN již byla zavedena hlavními operátory komunikačních sítí v celosvětovém měřítku. [3]

V České republice zajišťuje budování sítě LoRaWAN akciová společnost České radiokomunikace, která k rozšiřování sítě využívá již své vybudované vysílací body, které doplňuje o LoRaWAN základnové stanice. Vývoj pokrytí území České republiky od roku 2016 do roku 2018 je patrný z obr. 3. Z obrázku je patrné, že toto technologické odvětví zažívá v posledních letech skutečně rychlý rozvoj.

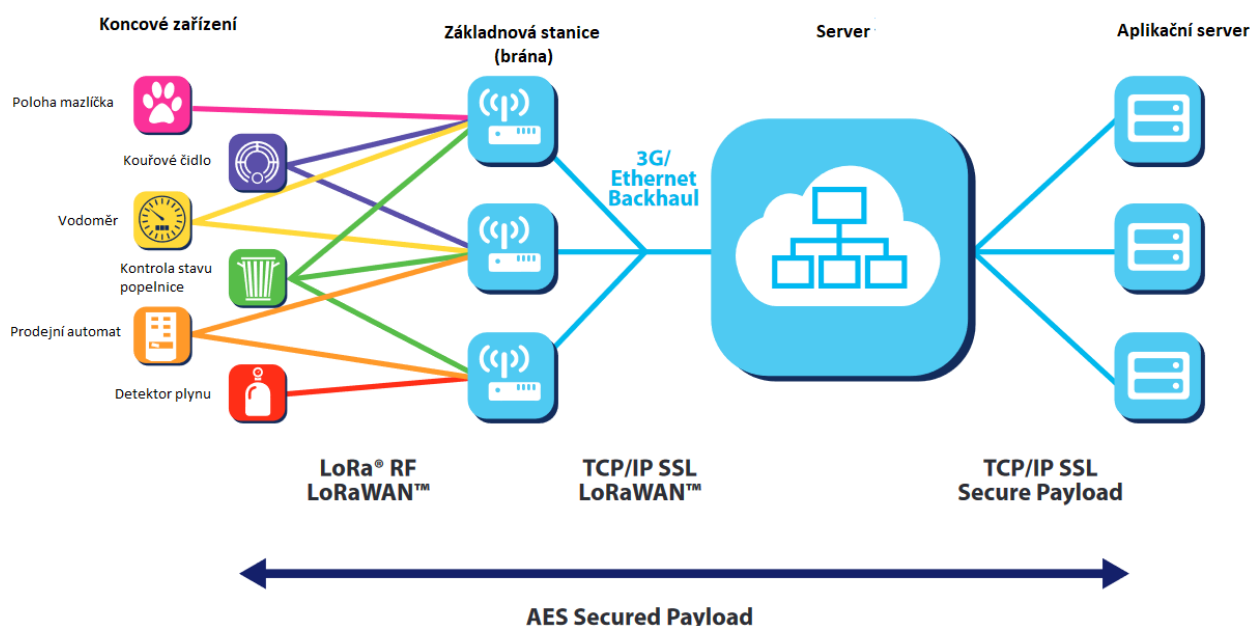


Obrázek 3 : Pokrytí sítě LoRaWAN v ČR [4]

LoRaWAN definuje komunikační protokol a architekturu sítě. Protokol a síťová architektura mají největší vliv na kapacitu sítě, bezpečnost a kvalitu poskytovaných služeb. Síť LoRaWAN pracuje v celé Evropě v nelicencovaném ISM pásmu s frekvencí 868 MHz.

Síť LoRaWAN se nejčastěji provozuje v topologii hvězda. Tato topologie neumožňuje dosažení tak velkých přenosových vzdáleností jako při použití topologie mesh, kde se jednotlivá koncová zařízení využívají také jako repeater a tím prodlužují maximální dosažitelnou vzdálenost. Velkou výhodou této topologie je, že každé koncové zařízení je připojeno přímo na bránu. Díky tomu lze přímo řídit režii provozu jednotlivých koncových zařízení a tím přímo ovlivňovat jejich spotřebu a prodlužovat výdrž baterie.

Na obr. 4 je zobrazené typické zapojení sítě LoRaWAN. Pokud je koncové zařízení v dané lokalitě schopno komunikovat s více branami, tak koncové zařízení není připojeno přímo pouze k jedné bráně, ale je připojeno ke všem branám zároveň. Datové pakety odesílané z koncového zařízení jsou tedy přijímány vícero branami. Každá brána pošle přijaté datové pakety z koncového bodu dále do serveru. Zpráva je doručena k serveru několikanásobně. Server rozezná podle sekvenčního čísla zprávy, že mu byla doručena vícekrát a kopie odstraní. Brána je připojena k serveru buďto prostřednictvím 3G sítě, nebo pomocí zabezpečeného připojení do internetu. Pakety, které jsou přijaty na server, jsou dále ověřeny, zpracovány a přeposlány na aplikační servery, kde jsou již podrobeny analýze konkrétním oprávněným uživatelům. [2]



Obrázek 4 : Princip sítě LoRaWAN [2]

Koncové body v síti jsou asynchronní a komunikují pouze v případě, že mají připravená data k odeslání, případně když mají naplánované odesílání dat. Tato metoda asynchronního přenosu se označuje anglickým slovem Aloha. V synchronních aplikacích jsou zařízení pravidelně dotazována, zda obsahují nová data, a musí tedy častěji komunikovat v síti, což má za následek větší energetickou spotřebu zařízení. Z toho plyne, že asynchronní provoz umožňuje efektivnější hospodaření s energetickou kapacitou zařízení. [2]

Komunikace směrem od čidla směřuje ke všem základnovým stanicím, kdežto komunikace směrem k čidlu od základnové stanice probíhá pouze z jedné brány a to z té, která disponuje nejlepšími rádiovými podmínkami, jenž byly vyhodnoceny na základě předchozí komunikace. [5]

Přenosová rychlost se pohybuje v rozmezí od 300 bit/sec do 50 kb/s. Šířka pásma je 125 kHz a 250 kHz. Šířka pásma se odvíjí od požadované rychlosti přenosu, která je proměnná v závislosti na stavu sítě. Pro dosažení neustálé provozuschopnosti sítě za současného připojení velkého množství koncových zařízení je zapotřebí disponovat velkou kapacitou sítě. Velké kapacity sítě je u technologie LoRaWAN dosaženo pomocí adaptivní přenosové rychlosti (ADR – adaptive data rate) s použitím vícekanálového multimodálního vysílače v základnové stanici, tak aby mohla přijímat zprávy na více kanálech zároveň. Brána je schopna přijímat v jeden okamžik různými přenosovými rychlostmi z více zařízení. Pokud je komunikující zařízení blízko brány a má dobré spojení, pak není důvod, aby vysílal nízkou přenosovou rychlostí a tím prodlužoval svůj provoz a blokoval tak kapacitu pro další zařízení. Serverem je tedy nastavena nejvyšší přenosová rychlost a dojde k přenosu během nejkratšího možné doby, což vede k prodloužení doby životnosti baterie a uvolnění kapacity sítě pro další zařízení. [2]

Z přechozího odstavce vyplývá, že jedním z důležitých úkolů serveru je vyhodnocení rádiových podmínek a počtu komunikujících koncových zařízení a optimální nastavení přenosové rychlosti koncového zařízení. Tuto přenosovou rychlost přímo ovlivňuje hloubka kódu, která je v dané modulaci použita. Tato hloubka kódu se v technologii LoRa označuje jako spreading factor (SF). SF se mění dynamicky podle okolních podmínek a ovlivňuje maximální vzdálenost, na kterou může komunikovat, ale taky od toho se odvíjející přenosovou rychlost a maximální velikost užitečných dat. SF nabývá hodnot v rozmezí 7 až 12. Dalším úkolem serveru, je vyhodnocovat EUI identifikátory a sekvenční čísla zpráv, díky kterým lze zjistit případné výpadky komunikace koncového bodu se sítí. [5]

Zabezpečení v síti LoRaWAN je realizováno na několika úrovních. Jedním z prvků ochrany komunikace, v souvislosti s podstrčením falešné zprávy do systému je číslo EUI. EUI má každý modem naprosto jedinečný, dalo by se ho analogicky přirovnat k MAC adrese používané v síti ethernet. Dále by bylo nutné znát odpovídající sekvenční číslo zprávy. Pokud by bylo použito neodpovídající sekvenční číslo, potom by server vyhodnotil chybu komunikace. Hlavním zabezpečovacím prvkem komunikace jsou dva 128 bitové šifrovací klíče pro zabezpečení AES128. [5]

První klíč se označuje NwkSkey s jedná se o tzv. síťový klíč. Tímto klíčem se šifruje obsah celé odesílané zprávy, kromě EUI. Dochází tedy k šifrování sekvenčního čísla zprávy, užitečné informace a rádiové informace, která je důležitá pro případné přenastavení vysílaného výkonu, použitého kanálu a použitého SF. Úkolem šifrovacího klíče je zajistit, aby do sítě nevnikla data podvrhnutý prvek. Správu síťových klíčů má na starosti provozovatel sítě. [5]

Druhým z klíčů je aplikační klíč a značí se AppSkey. Aplikační klíč šifruje užitečnou informaci a má za úkol udržet data zašifrované po celou dobu průchodu komunikačním systémem až po aplikační úroveň koncového uživatele. Za aplikační klíče zodpovídá provozovatel aplikace. [5]

Existují dva způsoby zavedení šifrovacího klíče do zařízení. První způsob je personalizací. Při této variantě je šifrovací klíč zapsán do zařízení přímo během procesu výroby. Druhý způsob je tzv. „over the air“ (vzdáleně bezdrátovým přenosem). Při této metodě jsou během výroby nahrány do zařízení dočasné klíče, díky kterým dojde při prvním přihlášení do sítě k autentizaci. Aplikační server vyhodnotí požadavek na generování šifrovacího klíče. V aplikačním serveru je následně sestavena zpráva, která obsahuje nové šifrovací klíče. Po přijetí těchto klíčů dojde k přepsání dočasných klíčů novými. [5]

Koncová zařízení v síti LoRaWAN se liší ve způsobu komunikace se základnovou stanicí a podle toho se dělí do 3 tříd:

- Třída A – Jedná se o komunikaci, která je plně řízena koncovým bodem. Koncové zařízení komunikuje pouze v případě potřeby a to buďto v předem nastavených intervalech, nebo v případě překročení kritických měřených hodnot (např. záplavové čidlo). Po odeslání zprávy následují dva krátké okna pro příjem dat ze sítě. Jedná se o energeticky nejúspornější třídu. [6]
- Třída B – Na rozdíl od třídy A nedochází k přijímání zpráv pouze po odeslání zprávy, ale v pravidelných intervalech. V praxi to znamená, že se zařízení pravidelně probouzí a očekává příjem zprávy bez závislosti na stavu měřených hodnot. Zde je nutná synchronizace se sítí, která je realizována pomocí synchronizačních impulzů, které jsou vysílány s intervalem 128 s. [6]
- Třída C – Okno pro příjem dat je stále otevřené. Provoz v této třídě je ze všech tříd energeticky nejnáročnější. Použití této třídy nachází uplatnění v aplikacích, kde je koncový bod připojen k stálému přívodu energie. V praxi je možno přepínat mezi jednotlivými třídami. Například v bateriově napájených zařízeních je možné pracovat v třídě A a v případě potřeby upgradu firmwaru přepnout zařízení do třídy C, provést potřebný příjem dat a po dokončení upgradu se přepnout zpět do třídy A. [6]

1.2 Sigfox

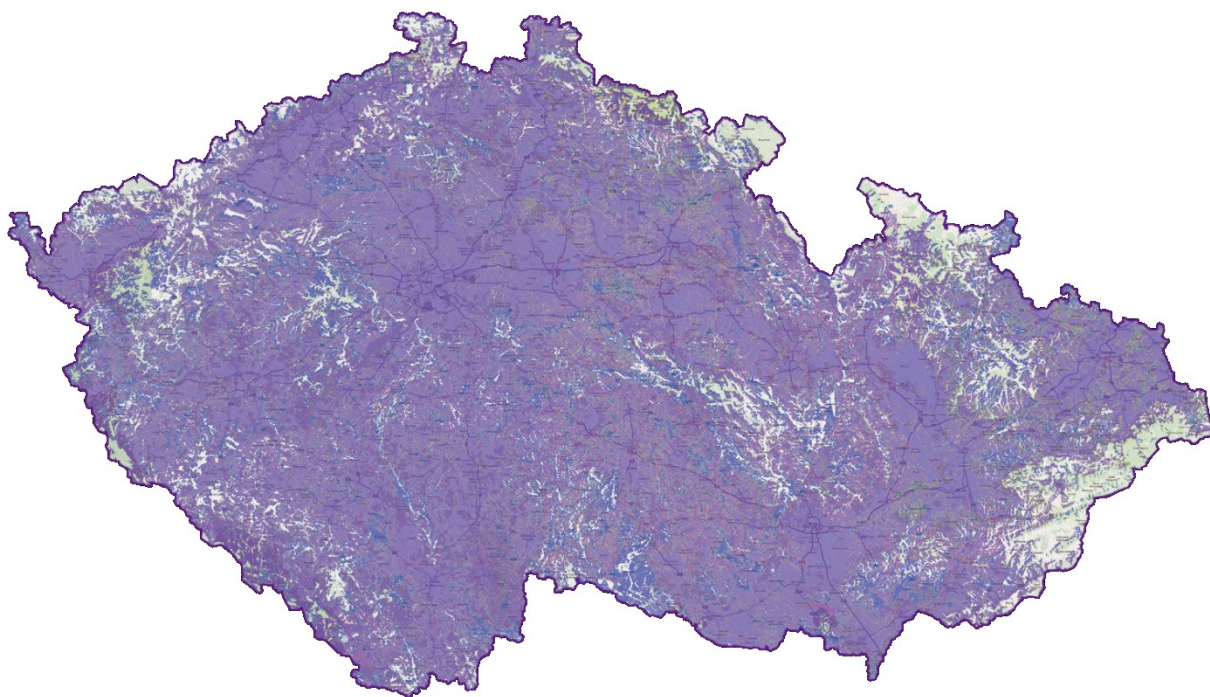


Obrázek 5 : Logo Sigfox

Sigfox je produktem stejnojmenné francouzské firmy, která ve Francii přímo poskytuje tuto síť. V ostatních zemích ji s budováním sítě pomáhají partnerské společnosti, nejčastěji poskytovatele telekomunikačních služeb.

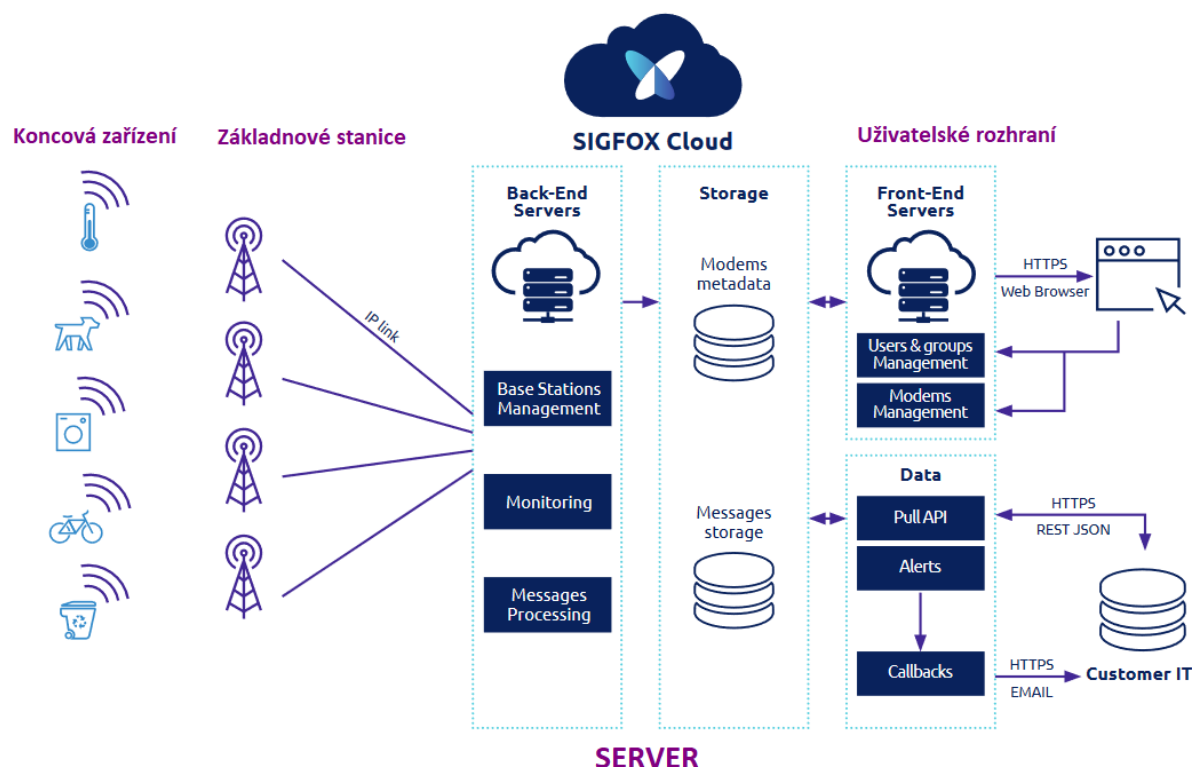
Na území České republiky je provozovatelem technologie Sigfox společnost SimpleCell. Společnost SimpleCell byla prvním operátorem pro internet věcí na českém trhu. Partnerem pro budování bezdrátového pokrytí je společnost T-Mobile, která poskytuje své již vybudované stožáry, které jsou osazovány základnovými stanicemi sigfox. [1]

Společnost SimpleCell v současnosti pokrývá 95% území české republiky. Uvnitř budov a v suterénech dosahuje 85% pokrytí obyvatelstva. Na obr. 6 je vidět aktuální oblast pokrytí technologií Sigfox. [7]



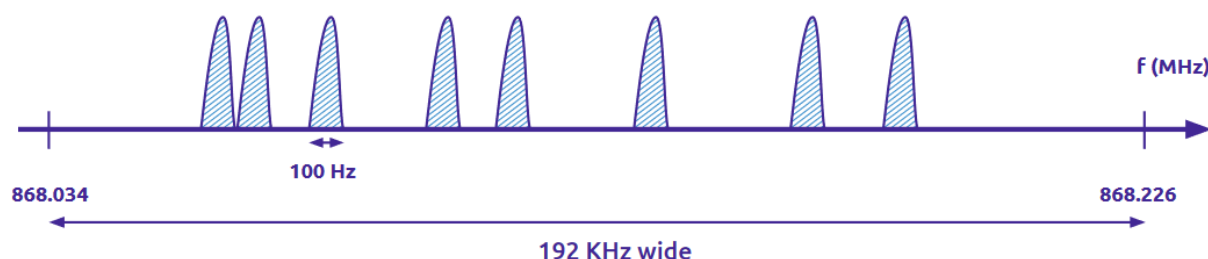
Obrázek 6 : Mapa pokrytí ČR technologií Sigfox [7]

Podobně jako u LoRaWAN je topologie sítě do hvězdy. Na obr. 7 je znázorněno typické zapojení a princip činnosti sítě Sigfox. Data z koncových zařízení jsou bezdrátově odesílána do základnových stanic. Základnové stanice jsou připojeny k serveru prostřednictvím DSL, 3G, 4G a pokud ani jedno z uvedených připojení není dispozici, je možné použít satelitní spojení jako alternativní záložní metodu připojení. Na serveru jsou dále v bloku Back-End přijaté zprávy protříděny. K třídění zpráv dochází z důvodu přijímání jedné zprávy z více základnových stanic, proto je repliky potřeba promazat. Protříděné zprávy putují na serverové uložení, kde kromě samotných užitečných zpráv jsou i uložena meta data pro pozdější zprávu sítě. Servery hlavní sítě monitorují stav sítě a globálně spravují základnové stanice. Posledním blokem je uživatelský přístup k datům, který je buďto pomocí webového prostředí, aplikace, případně jsou data stahovány na uživatelské servery. [8]



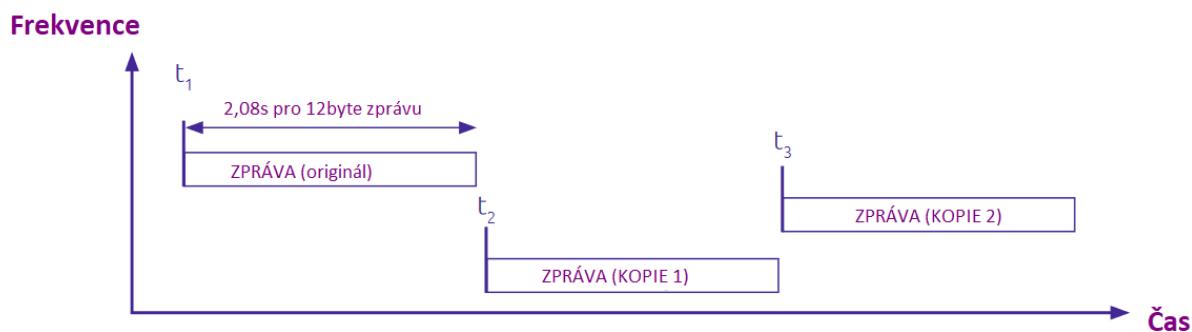
Obrázek 7 : Struktura sítě sigfox [8]

K bezdrátovému přenosu dat dochází v bez licenčním ISM pásmu o frekvenci 868 MHz. Konkrétně používána šířka pásma je 192 KHz. Využívá se zde technologie Ultra-Narrow Band (UNB) s modulací BPSK. UNB umožňuje efektivní komunikaci v síti s minimálními nároky na energetickou náročnost při vysílání. Frekvenční šířka pásma jedné zprávy je 100 kHz a zpráva je přenášena rychlostí 100 bit/s, nebo 600 bit/s v závislosti na oblasti, kde je služba provozována. Na území ČR je maximální rychlost 100 bit/s. Maximální délka odesílané zprávy je 12 bajtů, z čehož vyplývá, že při přenosové rychlosti 100 bit/s je zpráva přenášena 2.08 s. Na obr. 8 je zobrazeno frekvenční spektrum, kde jsou zobrazeny odesílané zprávy využívající technologii UNB. Z uvedeného obrázku je patrné, že ke komunikaci dochází v širší spektru 192KHz a každá zpráva má šířku 100Hz. Tato metoda umožňuje základnovým stanicím komunikovat na velké vzdálenosti, aniž by byla komunikace ovlivněna rušením. [8]



Obrázek 8 : Frekvenční spektrum komunikace Sigfox [8]

K odesílání zprávy nedochází pouze jednou, ale zařízení pošle jednu zprávu vícekrát, a to jak v jinou dobu, tak i na jiné frekvenci. Frekvence, na které bude odeslán duplikát zprávy je generovaná náhodně, jediným kritériem je, aby byla ve vymezené šířce pásma. Tento princip je výrobcem technologie označován jako frekvence hopping a je znázorněn na obr 9. [8]



Obrázek 9 : Frekvency hopping [8]

Kombinace UNB a frekvency hopping dělá z technologie Sigfox poměrně odolnou technologii vůči širokopásmovému rušení. V Pásmu ISM je veliký předpoklad rušení zapříčiněný velkým počtem komečních zařízení, která jsou na této frekvenci provozována. Aby byla zpráva přijata a bezchybně vyhodnocena základnovou stanicí, musí být úroveň užitečného signálu alespoň 8 dB nad úrovní šumu. [8]

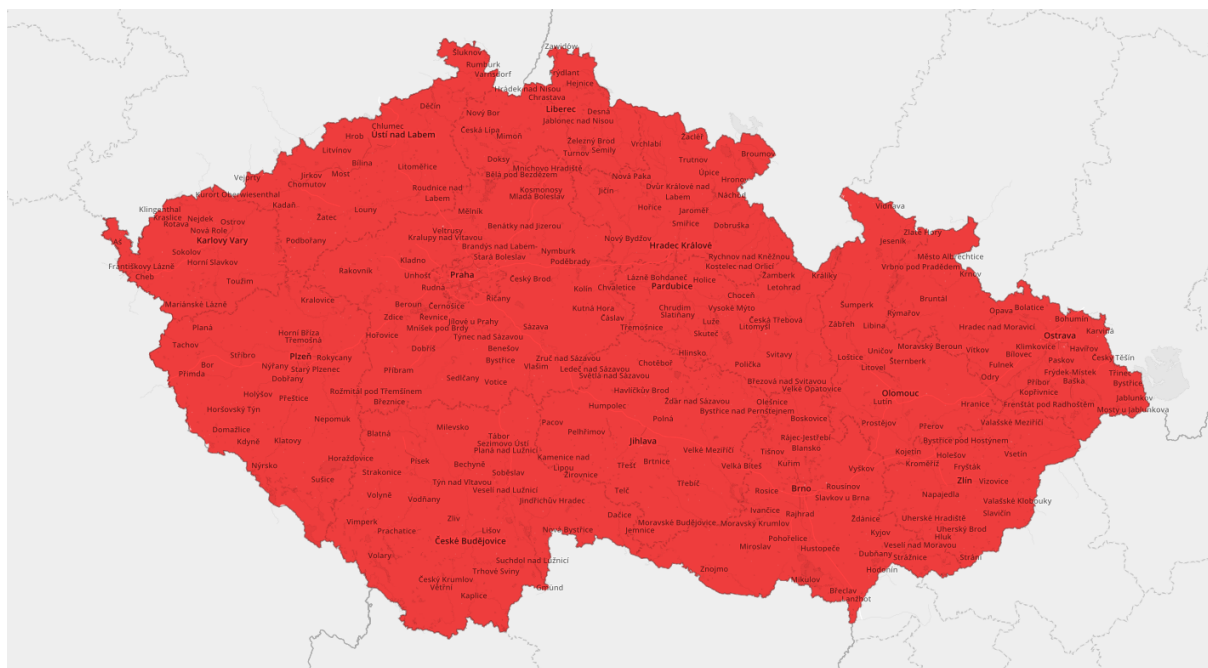
Jak již bylo uvedeno maximální délka odchozí zprávy je 12 bajtů a maximální počet zpráv je stanoven na 140 za den. V případě příchozích zpráv je toto omezení ještě větší. Maximální velikost příchozí zprávy je 8 bajtů a zařízení může přijmout nejvíce 4 zprávy za den. [8]

Bezpečnost komunikace zařízení je více stupňová. Prvním bezpečnostním prvkem je sequence number. Je to jakési počítadlo zpráv, kde po každém odeslání zprávy dochází k inkrementaci tohoto čísla. Tento prvek zabraňuje duplikování útočníkem zachycených zpráv. Po přijetí zprávy na server je toto pořadové číslo zprávy vyhodnoceno, a pokud neodpovídá předpokládané hodnotě, tak ji vyhodnotí jako chybovou, případně jako podvrh. Kromě toho, že slouží jako bezpečnostní prvek, slouží taky ještě jako ukazatel počtu odeslaných zpráv za den, které jsou v síti omezeny. Dalším důležitým prvkem ochrany je ověřovací klíč. Každé zařízení, které chce v síti Sigfox komunikovat, musí být certifikováno a je mu během výroby přiřazen jedinečný symetrický klíč, který je označován MAC (Message Authentication Code). Každá zpráva, kterou má zařízení přijmout nebo odeslat obsahuje šifrovací ukazatel, který je vypočten na základě ověřovacího klíče. MAC ověření zaručuje ověření odesílatele a integrity, tedy zda zpráva není změněna. V základním nastavení komunikace jsou užitečná data přenášena bez jakéhokoliv šifrování a v případě, že útočník zná strukturu rámce odesílané zprávy, může jej odposlouchávat. Jako ochranu proti tomu je možné implementovat vlastní zabezpečení tak, že k zašifrování zprávy dojde v zařízení, zpráva celou sítí prochází zašifrovaná a k dešifrování zprávy dochází až na uživatelské úrovni. Další variantou je spoléhat na šifrování navržené společností Sigfox ve spolupráci s CAE-LETI. Toto šifrování bylo navrženo pro velmi krátké zprávy a využívá klíč zařízení NAK (Network Authentication Key). Pro šifrování je použit klíč NAK, sequence number a rollover counter. [8]

1.3 NB – IoT

Označení technologie NB je zkratkou anglického výrazu Narrow Band. Jak z názvu vyplývá, jedná se o úzkopásmovou technologii. Technologie bývá nasazena v pásmech GSM a LTE. Při budování pokrytí sítí NB-IoT není potřeba fyzicky instalovat vysílače. K vybudování pokrytí stačí softwarově upravit již nainstalované stávající základnové stanice vysílačů určených pro běžné telefonické komunikace. Vybudování pokrytí tedy není tak složité jako u jiných technologií, které vyžadují instalaci vlastních základnových stanic, v případě NB stačí vhodně nakonfigurovat SDR (Software Define Radio). [9]

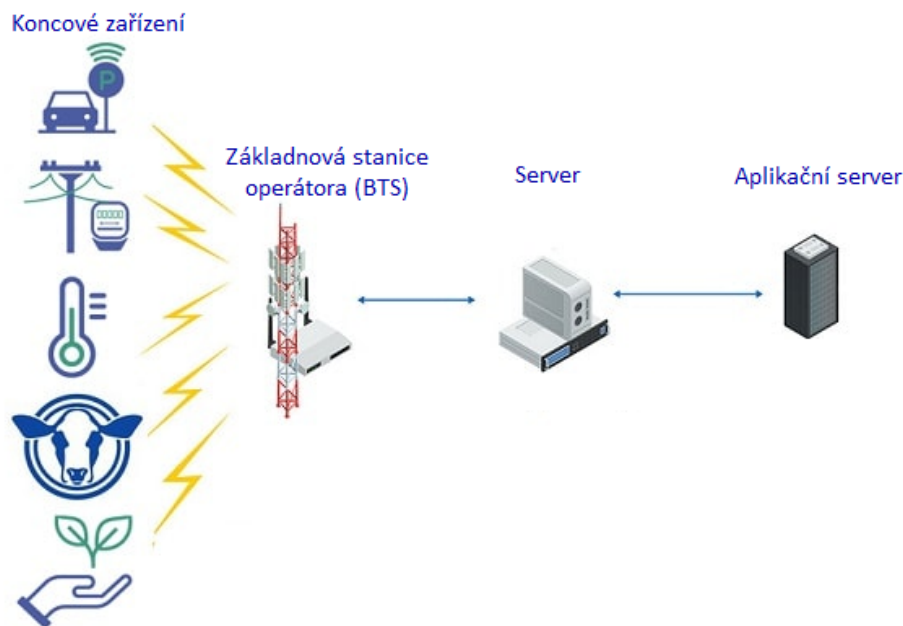
V České republice jsou poskytovatelem NB-IoT operátoři O2 a Vodafone, kde právě Vodafone byl prvním operátorem, který začal se zaváděním technologie na území ČR. Na obr. 10 je znázorněna mapa pokrytí operátorem Vodafone, který současné době pokrývá 100% území ČR a 94% populace uvnitř budov. Velkou výhodou této technologie je, že signál se dobře šíří i v budovách a suterénech. [10]



Obrázek 10 : Mapa pokrytí NB-IoT operátorem Vodafone [11]

NB-IoT je standardizace, která vznikla v roce 2014 na základě studie partnerského projektu 3GPP. Organizace 3GPP vznikla dohodou o spolupráci v mobilní komunikaci. Má na starosti standardizaci plošně používaných mobilních technologií. [9]

Topologie sítě je znázorněna na obrázku 11. Principiálně je podobná již výše uvedeným technologiím. Koncové zařízení komunikují se základnovou stanicí mobilního operátora a tato stanice je již pevným připojením spojena se serverem. Data z hlavního serveru jsou dále zpřístupněna uživateli na aplikačním serveru.

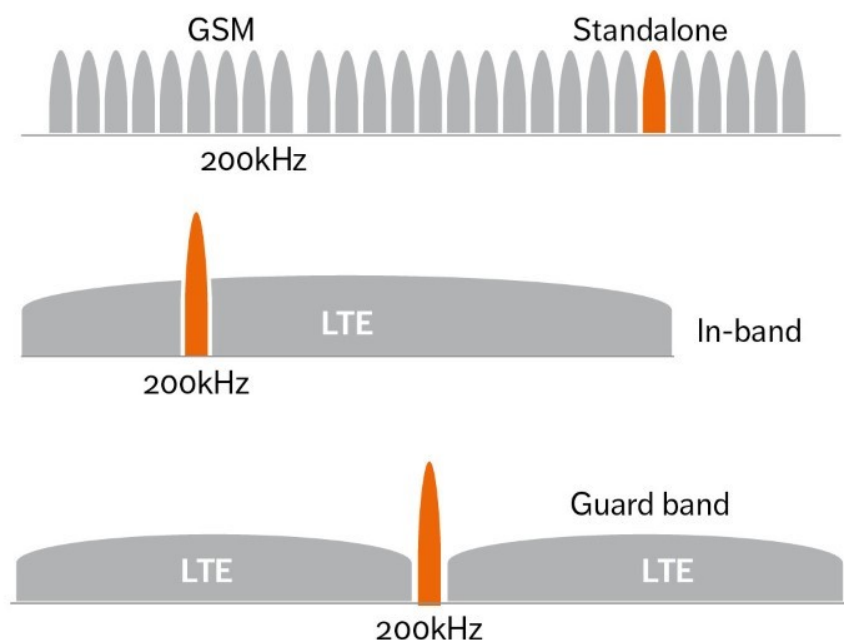


Obrázek 11 : Princip sítě NB-IoT [12]

Šířka přenosového pásma je 200 KHz, což je shodné s šířkou nosné u GSM technologie. Jsou 3 způsoby začlenění nosné NB-IoT do frekvenčního pásma. Využívá se licencované frekvenční pásmo, které je vyčleněno pro technologie GSM, WCDMA a LTE. Níže uvedené způsoby začlenění NB-IoT do již předem definovaných standardů jsou navrženy co možná nejefektivněji, aby došlo k co nejúčinnějšímu provozu a současně k co nejmenšímu rušení souběžně běžících technologií. [9] Na obr. 12 je znázorněno začlenění nosné NB-IoT do ostatních technologií.

Způsoby zasazení NB-IoT do již provozovaných technologií:

- Standalone – Používá se v případě začlenění do spektra technologie GSM. Jak již bylo zmíněno, šířka pásma nosné GSM signálu a NB-IoT je shodná a toho se využívá. Jedná nosná GSM signálu je nahrazena nosnou NB-IoT.
- In-Band – Nosná je zavedena přímo do LTE spektra. Vysílání Nb-IoT je na rozdíl od LTE provozu časově krátké a úzkopásmové, nedojde tedy k rušení a ovlivnění činnosti LTE technologie.
- Guard-Band – Nosná je vysílána v ochranném pásmu mezi LTE pásmy, díky čemuž nedochází k žádnému rušení a tyto dvě technologie můžou neustále paralelně pracovat. [9]



Obrázek 12 : Možnosti využití spektra NB-IoT [9]

K provozování komunikace pomocí technologie NB-IoT je potřeba, aby každé koncové zařízení disponovalo SIM kartou vydanou operátorem, která je do dané sítě registrovaná. Přenosová rychlost je cca 200Kb/s, což dělá ze všech LPWAN technologií tu nejrychlejší. Maximální velikost datového rámce je 1000 bitů pro odesílání a 680 bitů pro stahování. [9]

Jelikož technologie NB-IoT funguje na již vybudované infrastruktuře a využívá již zavedené technologie, je její zabezpečení srovnatelné s LTE technologií. Stejně jako současné LTE sítě, tak i NB-IoT podporuje nejmodernější zabezpečení na základě standardu 3GPP s autentizací jednotlivých zařízení a šifrováním dat i přenosu. [9]

1.4 Srovnání technologií LPWAN

Z hlediska budování pokrytí sítě, se jako nejjednodušší jeví NB-IoT, jelikož využívá již vybudované základnové stanice, na kterých je provedena pouze softwarová úprava vysílačů. Ostatní technologie vyžadují fyzickou instalaci nových základnových stanic. Z hlediska ceny základnových stanic jsou však podstatně levnější stanice pro technologie LoRa a Sigfox. Ceny stanic těchto technologií (LoRa, Sigfox) se pohybují maximálně kolem 20 000 Kč. U základnové stanice pro GSM/LTE, respektive NB-IoT jsou pořizovací náklady asi 10 krát vyšší.

Největší přenosovou rychlost má technologie NB-IoT, kde se standardní přenosová rychlost pohybuje okolo 200 kb/s. Nejpomalejší je síť sigfox, kde je maximální přenosová rychlost 100bit/s. Přenosová rychlost není u LPWAN klíčovým parametrem, jelikož podstatou technologií LPWAN není přenos objemných dat. Jelikož se při používání LPWAN technologií uvažuje občasné odesílání dat o malém objemu, je proto možné parametr rychlosti přenosu částečně opomenout.

Citlivost přijímačů jednotlivých technologií je srovnatelná a pohybuje se kolem -140 dBm. Vysílací výkon je v nelicencovaném ISM pásmu legislativně omezen na maximálně 25mW, to se týká technologií LoRa a Sigfox. NB-IoT je provozováno v licencovaném pásmu, takže vysílací výkony zde mohou být až 500mW. Komunikační rádius uvedených technologií v otevřeném prostoru dosahuje cca 10 km.

Hlavní výhodou technologie NB-IoT je, že disponuje 100% pokrytím území ČR a dosahuje dobré funkčnosti i v zastavěných oblastech. Nevýhodou je, že pro komunikaci v síti musí být zařízení opatřeno SIM kartou, neumožňuje to tedy tak jednoduchou a masovou implementaci zařízení koncovým zákazníkům. Z hlediska výkonové spotřeby je na tom NB-IoT nejhůře. Zařízení NB-IoT vysílají podstatně větším výkonem než ostatní technologie a to má zásadní vliv na životnost baterie v zařízení. Zařízení NB-IoT je proto vhodnější používat v aplikacích, kde se předpokládá menší komunikační provoz v řádu několika dnů v měsíci. V opačném případě, kdy by zařízení komunikovalo denně, by byla životnost jeho baterie značně zmenšena.

Nevýhodou technologie Sigfox je maximální velikost přenášených uživatelských dat (payload). Ta je maximálně 12 bajtů. Další nevýhodou je, že zařízení v síti Sigfox může odeslat maximálně 144 zpráv za den. U ostatních technologií počet zpráv omezen není. V tabulce 1 jsou přehledně shrnuty základní technické parametry jednotlivých technologií.

Tabulka 1: Přehled vybraných parametrů LPWAN technologií

	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Frekvenční pásmo	868 MHz	868 MHz	GSM/LTE 847 - 806 MHz 2 540 - 2660 MHz
Licencované pásmo	Ne	Ne	Ano
Maximální citlivost přijímače	-136 dBm	-142 dBm	-141 dBm
Přenosová rychlost	50 kb/s	100 b/s	200 kb/s
Technologie	Proprietární	Proprietární	Standardizace 3GPP
Max. velikost zprávy (payload)	230 b	12 B	125 B (upload) 85 B (download)
Max. Počet zpráv denně	Neomezeně	144	Neomezeně
Max. vysílací výkon	25 mW	25 mW	500 mW

2. Environmentální jednotka a měřené veličiny

Úlohou této jednotky je měření environmentálních veličin. Environmentálními veličinami se rozumí fyzikální veličiny okolního prostředí. V případě navrhované jednotky jsou měřenými veličinami teplota, vlhkost a atmosférický tlak vzduchu. Z těchto veličin je možné dále postprocesingem získat doplňující parametry, jako jsou rosný bod, či případně z atmosférického tlaku odvodit nadmořskou výšku ve které se jednotka nachází. Další měřenou veličinou je intenzita okolního světla, která může posloužit v dalším zpracování k přesnému odvození času východu a západu slunce. Dále je měřena kvalita ovzduší v podobě měření obsahu CO_2 ve vzduchu a analýza výskytu těkavých látek ve vzduchu. Poslední měřenou veličinou je zrychlení, což slouží primárně jako prvek ochrany, kdy je možno detekovat pomocí pohybu cizí zásah do jednotky.

Naměřené hodnoty jsou v pravidelných intervalech odesílány na server, kde jsou připraveny k další analýze naměřených dat. Kromě pravidelného odesílání jsou pro jednotlivé veličiny předdefinovány mezní hodnoty, kde v případě překročení těchto mezních hodnot dochází k mimořádnému odeslání zprávy.

2.1 Měření teploty

Metod měření teploty je mnoho, ať už to jsou například běžné ukazovací teploměry, kde vlivem teploty dochází k roztažnosti kapalin, podle nichž je možné určit okamžitou teplotu až po ty elektronické, s analogovým, případně číslicovým výstupem. Elektronické snímání teploty lze obecně rozdělit do dvou hlavních skupin:

- **Bezdotykové měření** – Senzor se nenachází v přímém kontaktu s bodem, na kterém je prováděno měření a nedochází tak k přímému ovlivňování. Využívá se zde principu pyrometrie, což znamená, že měřený objekt vyzařuje teplotě úměrnou vlnovou délku infračerveného záření. [13]
- **Dotykové měření** – Senzor je v přímém kontaktu s měřeným objektem a dochází k přenosu tepla mezi dvěma předměty. [13]

V jednotce je měření řešeno přímým dotykovým měřením kde dochází k přenosu tepla mezi okolím a snímačem. Základní principy přímého měření teploty elektronických snímačů jsou:

- **Odporové snímače** – Založeny na principu teplotní závislosti elektrického odporu kovů nebo polovodičů. Odpor snímače je vyhodnocován výpočtem z Ohmova zákona, kde při měřícím proudu I je vyhodnocován měřený úbytek napětí na odporu. [13]
 - Kovové odporové snímače – U kovů dochází se zvětšováním teploty, ke zvětšování odporu. Nejčastěji používanými materiály jsou platina a nikl.
 - Polovodičové odporové snímače
 - Termistory – Elektrický odpor materiálu je závislý na teplotě vlivem závislosti koncentrace volných nosičů náboje na teplotě. [9]
 - Monokrystalické CMOS senzory – se změnou teploty dochází ke změně pohyblivosti volných nosičů náboje. Roste-li teplota, potom klesá pohyblivost a tím roste odpor vodiče. Využívá se v integrovaných obvodech s CMOS tranzistory. [13]
- **Křemíkové PN senzory** – Využívají teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Při určitém proudu odpovídá určité změně teploty změna napětí na PN přechodu. [9]

- **Termoelektrické senzory** – Využívají jevu přeměny tepelné energie na elektrickou vlivem spojení vodičů, ze dvou různých kovů, v jednom bodě. Tento jev se nazývá Seebeckuv jev. Vlivem tohoto jevu na volných koncích vzniká elektrické napětí. [13]
- **Krystalové senzory** – Vlivem změny teploty dochází ke změně rezonančního kmitočtu broušeného krystalu. Jedná se o přímou přeměnu teploty na frekvenci. [13]
- **Senzory s optickým vláknem** – Optické vlákno je na konci opatřeno teplotně závislou vrstvou fosforu, který po osvětlení světelným impulsem vyzáří světlo zpět s určitým časovým zpožděním, toto zpoždění je závislé na teplotě. [13]

V navržené jednotce je použit snímač, který využívá principu odporových snímačů. Konkrétně se jedná o monokrystalický snímač s integrovanými CMOS tranzistory. Detailnější popis použitého snímače bude uveden v kapitole zabývající se realizací jednotky.

2.2 Měření vlhkosti

Vlhkost vzduchu udává, jaké množství vodní páry je obsaženo v daném množství vzduchu. Měření vlhkosti vzduchu je důležité v klimatologii a meteorologii, jelikož objem vodních par ve vzduchu má zásadní vliv na podnebí a počasí. [17]

Z fyzikálního hlediska se pro měření vlhkosti využívá několika různých metod. Metoda psychometrická, hygrometrická a metoda rosného bodu. Z hlediska elektronické měření se zásadně využívá metoda hygrometrická. Při této metodě se využívá vlastnosti některých látek, které jsou schopny absorbovat vzdušnou vlhkost a tím měnit své vlastnosti. Při elektronickém měření se využívá toho, že daná látka vlivem vlhkosti mění své elektrické vlastnosti, které jsou dále měřeny a převedeny na výslednou relativní vlhkost. [14] Hygrometrické snímače se dále liší podle toho, která elektrická vlastnost je závislá na vlhkosti. V praxi používanými hygrometrickými snímači jsou:

- **Odporové senzory** – Využívá materiálů, které jsou schopny absorbovat vlhkost z okolního vzduchu a vlivem absorpce vlhkosti dochází ke změně vodivosti materiálu. Konstrukčně jsou vyráběny buďto jako dvojité spirály z vodiče na válci z izolantu, nebo jako dva hřebínky napařené na keramické destičce. Měření je prováděno střídavým napětím z důvodu prevence před polarizací elektrod. Senzory jsou citlivé na orosení, nejsou též vhodné pro měření za vysokých teplot. [15]

Kapacitní senzory – Stejně jako odporové snímače využívají materiálů se schopností absorpce vlhkosti. Vlivem absorpce vlhkosti dochází ke změně kapacity kondenzátoru s polymerním dielektrikem. Jedna z elektrod je děrovaná, což umožňuje kontakt okolního vzduchu s dielektrikem. Senzory nejsou tak náchylné na rosení jako odporové snímače a vyznačují se dobrou odolností proti vyšším teplotám. [15] Navržená jednotka využívá k měření vlhkosti kapacitní snímač. Kapacitní snímače vynikají svými malými rozměry, malou spotřebou a odolností vůči rosení.

- **Elektrolytické senzory** – Speciální roztok absorbuje vlhkost vzduchu a dochází k reakci absorbované vlhkosti vzduchu s elektrolyticky vylučovaným činidlem. Absolutní vlhkost vzduchu je úměrná prošlému elektrickému náboji. Přepočít se provádí pomocí známých fyzikálních konstant. Senzory se vyznačují dlouhodobou stabilitou. [15]
- **Senzory s vyhříváním termistorů** - Využívají předpokladu, že tepelná vodivost vzduchu je závislá na jeho vlhkosti. Senzor se skládá ze dvou stejných termistorů, z nichž jeden je volně přístupný okolnímu vzduchu a druhý je hermeticky uzavřen v suchém dusíku. Termistory jsou

zapojeny do série a vlivem protékajícího proudu dochází k jejich zahřívání. Dosažená teplota je závislá na stupni jejich ochlazování, tedy na tepelné vodivosti okolního prostředí. Nevýhodou těchto senzorů je jejich vyšší proudová spotřeba. [15]

2.3 Měření atmosférického tlaku

V praxi se měření atmosférického tlaku většinou využívá především k určení nadmořské výšky. Měření nadmořské výšky pomocí tlakoměru vyžaduje průběžné kalibrování, jelikož atmosférický tlak se vlivem počasí mění. Měření atmosférického tlaku se taktéž využívá pro meteorologické předpovědi.

Nejpoužívanějšími snímači tlaku jsou snímače s membránou. Nemusí se však nutně jednat o membránu, namáhanou mechanickou částí může být také např. struna, vlnovec, píst. Snímače se dále dělí podle metody, kterou je vyhodnocována výchylka membrány, ke které dochází vlivem působení tlaku. Snímače mechanického namáhání se často také označují jako tenzometry. [16]
Dělení snímačů tlaku s elektrickým výstupním signálem:

- **Odporové snímač** – Fungují na principu změny odporu vodiče, která je vyvolána jeho deformací. Změna odporu je závislá na mechanickém namáhání vodiče. Deformační částí je zpravidla membrána ve tvaru desky. [16]
- **Piezorezistivní odporový snímač** – Měrný odpor monokrystalického křemíku s příměsí stopových prvků je závislý na mechanickém namáhání. Měřicím členem je destička, na kterou jsou vytvořeny vodivé cestičky, obvykle uspořádané do Wheatsonova můstku. [16]
- **Kapacitní snímače** – Membrána je tvořena z tenkého vodivého materiálu a zároveň slouží jako vychylující se elektroda. Tato elektroda se vychyluje mezi dalšími dvěma elektrodami. Prostor mezi elektrodami tvoří dielektrikum. Takto vzniká dvojice kondenzátorů, kterým se kapacita mění v závislosti na mechanickém namáhání membrány. [16]
- **Indukčnostní snímače** – Mechanické uspořádání je podobné jako u kapacitních senzorů s tím rozdílem, že místo pevných elektrod jsou v tělese zabudovány snímací cívky. Magnetický obvod je uzavřen přes jádro cívky a vzduchovou mezeru. Mechanickým namáháním membrány dochází k změně poměru indukčnosti obou cívek. [16]
- **Piezoelektrické snímače** – U některých druhů krystalů vzniká působením mechanického namáhání elektrický náboj. V plochách orientovaných na osu namáhání jsou speciální výbrusy a plochy jsou opatřeny elektrodami. V praxi se obvykle používají dva krystaly ve tvaru disku, uspořádané do tzv. piezoelektrického dvojčete. [16]
- **Rezonanční snímače** – Využívají závislosti vlastní frekvence mechanického kmitání na jeho mechanickém namáhání. Kmitání je buzeno elektromagneticky. Rezonanční kmitočet závisí na mechanickém napětí membrány, tedy na tlaku, který na membránu působí. [16]
- **Optický snímač** – Mnohavidové optické vlákno je umístěno mezi dvěma destičkami s vyniklými zuby. Vlivem působení tlaku dochází k ohybům optického vlákna na jednotlivých zubech, což vede k úbytku výstupního optického výkonu. Úbytek je úměrný tlaku mechanického namáhání. [16]

2.4 Měření oxidu uhličitého

Oxid uhličitý je plyn, který má chemické označení CO_2 . Jedná se o tzv. skleníkový plyn, který vzniká oxidací organických látek, spalováním CO , spalováním uhlovodíků a je produktem látkové výměny většiny organismů. Jedná se o bezbarvý plyn bez zápachu a je 1,52x těžší než vzduch, proto se při větších koncentracích drží u země. Koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu má zásadní vliv na kvalitu ovzduší. Příliš vysoká koncentrace CO_2 ve vzduchu má negativní vliv na lidské zdraví. [18]

Měření tohoto plynu je nejčastěji realizováno za účelem automatizovaného dohledu nad kvalitou vzduchu v uzavřených prostorech a v závislosti na naměřených hodnotách je řízeno vhodné odvětrávání prostorů. Principy měření koncentrace CO_2 jsou následující:

- **Optický senzor** – Využívá absorpce infračervené části spektra v molekulách CO_2 . Základními prvky snímače jsou IR zářič a IR snímač. Zářič vyzařuje infračervené světlo o určité vlnové délce a snímač detekuje zeslabení intenzity infračerveného záření určité délky. Ukazatelem koncentrace CO_2 je úbytek intenzity infračerveného světla. Snímače vynikají nejvyšší přesností, ale také vysokou pořizovací cenou na rozdíl od níže zmíněných. [18]
- **Elektrochemický senzor** – Reakcí molekul plynu s elektrolytem (uzavřeným v těle senzoru) vzniká elektrický signál úměrný koncentraci plynu. Materiál elektrolytu i elektrod je spolu s napětím volen vhodně tak, aby na měřené elektrodě docházelo k elektrochemické reakci, která je doprovázena vznikem volných elektronů. Nevýhodou senzorů je jejich krátká životnost způsobená chemickými změnami, kterou vedou k vyčerpání elektrolytu. [18]
- **Polovodičový senzor** – Vlivem přítomnosti snímaného plynu dochází ke změně vodivosti polovodiče. Nejčastěji používanými materiály jsou oxidy kovů. Na povrchu těchto materiálů se za pomoci zahřívání vytváří rovnovážný vztah s molekulami kyslíku, který se za přítomnosti plynu poruší a způsobí změnu vodivosti. Předností je jejich dlouhá životnost v řádu několika let. Sensory se často používají v domácích stacionárních aplikacích, kde není možná jejich častá kalibrace. [18]

Kromě koncentrace oxidu uhličitého ve vzduchu je taky důležitým ukazatelem kvality ovzduší výskyt organických těkavých látek. Organické těkavé látky se označují zkratkou VOC (Volatile Organic Compounds). Jedná se o chemické látky, které se uvolňují z pevných látek v podobě plynů. V uzavřených prostorech může být koncentrace těchto látek až 100x vyšší než ve volném prostoru. Ne všechny tyto látky jsou zdraví škodlivé, avšak existují látky, které jsou závažně škodlivé lidskému organismu. Mezi nebezpečné látky patří formaldehyd, fenol a benzen. Jelikož se jedná o plynné látky, tak snímače VOC fungují na podobných principech jako snímače CO_2 . [19] Snímač použitý v realizaci jednotky sdružuje měření jak CO_2 tak i VOC.

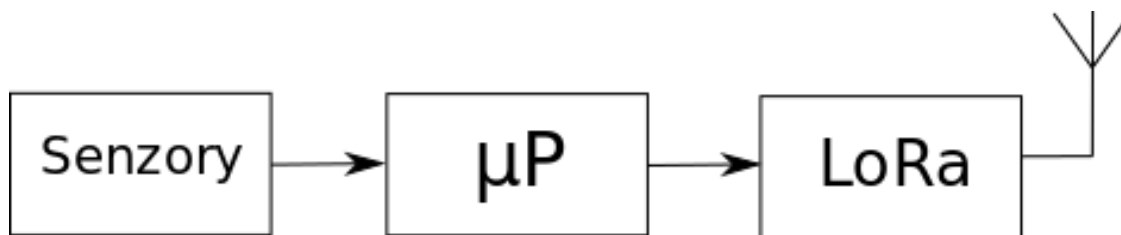
2.5 Měření intenzity světla

Intenzita osvětlení je fotometrická veličina. Jedná se o množství světelného toku dopadajícího na plochu. Jednotkou je lux a jeden lux je vyvolán dopadem jednoho lumenu na plochu jednoho metru čtverečního. Měření intenzity světla se provádí buďto v uzavřených prostorech, kde je měřena kvalita vnitřního osvětlení, nebo venku, kde může sloužit k automatizovanému měření denního světla a na základě měření může být ovládáno venkovní osvětlení. [20] Pro měření intenzity světla se používá k detekci světla těchto fotocitlivých součástek:

- **Fotorezistor** – Je pasivní elektronická součástka bez polovodičového přechodu. Vlivem vnitřního fotoelektrického jevu dochází se změnou dopadající intenzity světla ke změně vodivosti součástky. Jeho elektrický odpor se se zvyšující intenzitou dopadajícího světla snižuje. Nevýhodou použití fotorezistoru je jeho velká teplotní závislost, především při nižších úrovních osvětlení. [21]
- **Fotodioda** – Polovodičová dioda upravená tak, aby do PN přechodu pronikalo světlo. Foton, který dopadne na PN přechod, předá svojí energii elektronu ve valenční vrstvě atomu. Elektron energii absorbuje a tím získá dostatečnou energii pro opuštění valenčního pásu a přechod do vodivostního pásu. Vznikají tak volné nosiče náboje, díky kterým se zvyšuje vodivost polovodičové diody. [22]
- **Fototranzistor** - Bipolární křemíkový tranzistor, jehož kolektorový PN přechod je přístupný dopadajícímu světlu. Přítomnost světla na kolektorovém přechodu způsobí otevření tranzistoru a vyvolá proud mezi kolektorem a emitorem. Stupeň otevření tranzistoru je úměrný intenzitě dopadajícího světla na PN přechod. [23]

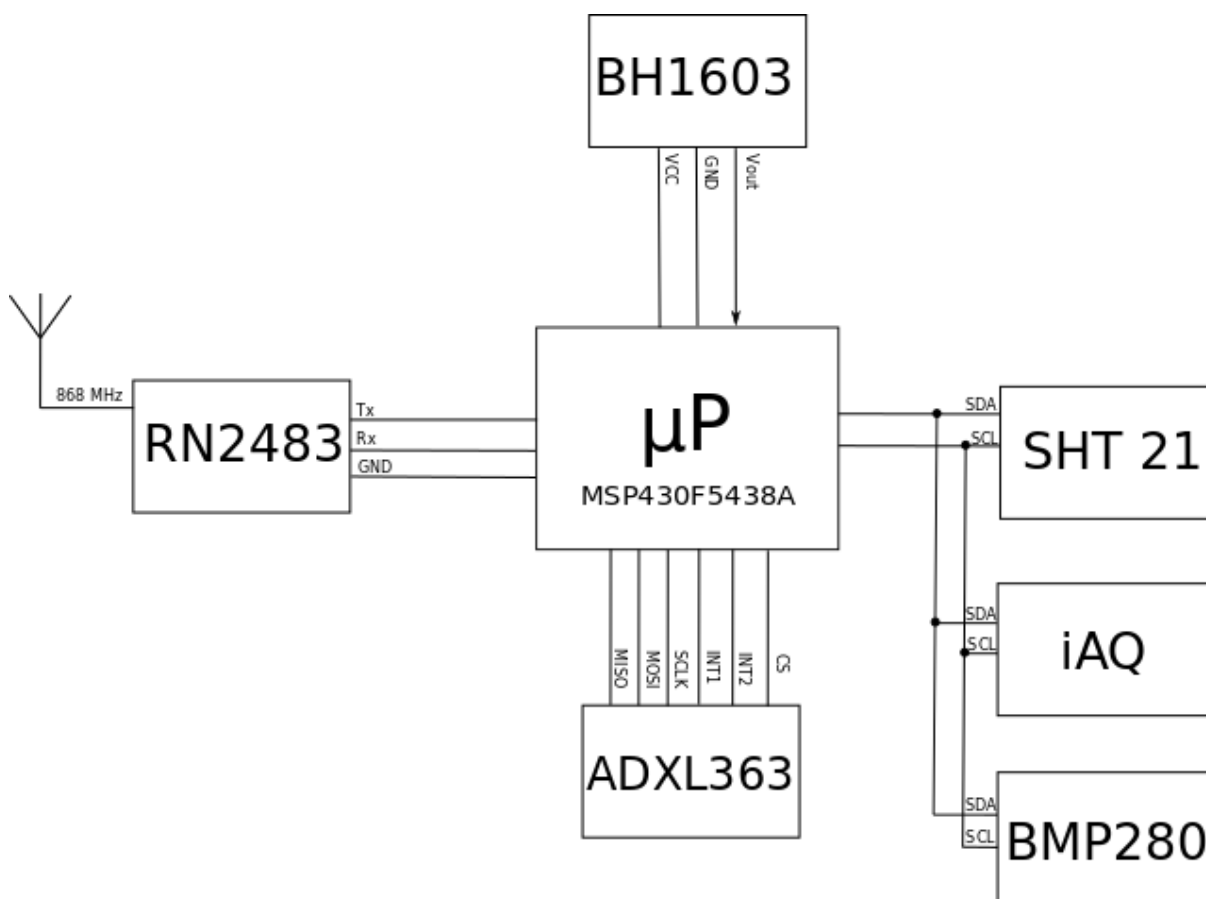
3. Praktická realizace environmentální jednotky

Tato kapitola se zabývá teoretickým návrhem environmentální jednotky a následnou praktickou realizací prototypu jednotky. Environmentální jednotka je realizována z několika důležitých bloků, které se dělí do tří hlavních částí. Centrálním blokem celé jednotky je mikropočítač. K mikropočítači jsou připojeny senzory fyzikálních veličin, které tvoří druhý funkční blok. Třetím důležitým blokem je komunikační rozhraní, díky kterému může jednotka komunikovat v síti LoRa. Základní blokové schéma je znázorněno na obr. 13.



Obrázek 13 : Základní blokové schéma jednotky

Mikropočítač zpracovává data z jednotlivých senzorů, které komunikují s mikropočítačem prostřednictvím sběrnic. Naměřené hodnoty veličin jsou dále na základě vyhodnocení přeposílány komunikačním modulem na server prostřednictvím sítě LoRa. Podrobnější principiální blokové schéma je znázorněno na obr. 14. Senzory teploty, vlhkosti, tlaku a kvality ovzduší komunikují s mikropočítačem prostřednictvím sériové sběrnice I²C. Akcelerometr je s mikropočítačem propojen SPI sběrnicí. Sensor intenzity světla má analogový výstup, který je připojen k A/D převodníku mikropočítače.

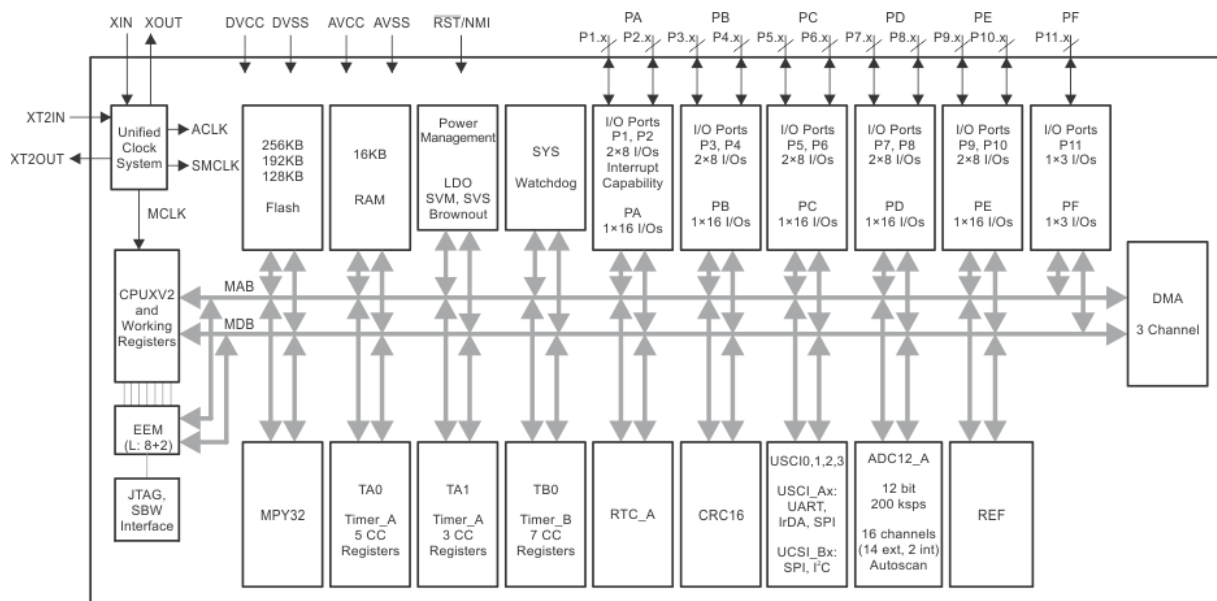


Obrázek 14 : Detailní blokové schéma jednotky

3.1 Mikroprocesor

V jednotce je použit mikropočítač MSP430F5438A. Jedná se o mikropočítač od firmy Texas Instrument z rodiny MSP mikropočítačů. Tyto mikropočítače se vyznačují vysoce nízkou výkonovou spotřebou a jeho použití je předpokládáno v mobilních zařízeních, které jsou napájeny bateriově. Mikropočítač je navrhnut tak, aby umožňoval výkonově co nejúspornější provoz. Provoz mikropočítače je možný v 5 různých režimech, které se liší v celkové spotřebě mikropočítače. [24]

Architektura mikroprocesor (CPU) je 16-bitová s redukovanou instrukční sadou (RISC). Vnitřní systémový takt je až 25 MHz. Na obr. 15 je zobrazeno vnitřní blokové schéma vybraného mikropočítače. Mikropočítač disponuje vysoce výkonným 12-bitovým analogově-digitálním převodníkem (ADC). ADC pracuje v režimu sample and hold, a má 14 externích a 2 vnitřní kanály. ADC disponuje také vlastní vnitřní referenční úrovní, takže není zapotřebí zajišťovat přestný externí refereční zdroj. Má 87 vstupně-výstupních portů díky čemuž je schopen ovládat a komunikovat s velkým množstvím různých periférií. Vnitřní digitálně ovládaný oscilátor (DCO) umožňuje probouzet zařízení z úsporného nízko spotřebového režimu, čehož je v realizované jednotce využíváno. Provoz mikropočítače je možný od 3,6V do 1,8 V a to díky integrovanému power managment bloku, který obsahuje LDO. Komunikace s mikropočítačem je možná pomocí sběrnic I²C, SPI a UART. [24]



Obrázek 15 : Vnitřní blokové schéma mikropočítače MSP430F5438A [24]

3.2 Senzor teploty a vlhkosti



Obrázek 16 : Senzor SHT21 [25]

Senzor použitý pro snímání teploty a vlhkosti nese výrobní označení SHT21. Výrobce senzoru je firma Sensirion. Senzor umožňuje měřit teplotu i relativní vlhkost zároveň. Měření relativní vlhkosti vzduchu funguje na kapacitním principu měření, který je popsán v kapitole zabývající se měřením vlhkosti. Měření teploty je realizováno odporově, konkrétně se jedná o monokrystalický CMOS senzor. Celý snímací čip se skládá z již zmíněných senzorů teploty a vlhkosti a dále je doplněn od A/D převodníky, ODP pamětí a mikroprocesoru. Naměřené výstupní hodnoty jsou zpřístupněny v digitální podobě a jsou distribuovány pomocí I²C sběrnice. Rozlišení měření relativní vlhkosti je 12 bitů a teploty 14 bitů. Naměřená data jsou přenášena ve dvou bajtových balíčcích. Přijaté hodnoty ze senzoru je zapotřebí pomocí následujících vzorců přepočítat na hodnotu vlhkosti v procentech a teplotu ve stupních Celsia. [25]

Výpočet relativní vlhkosti:

$$RH = -6 + 125 \cdot \frac{S_{RH}}{2^{16}} \quad [\%RH] \quad (1)$$

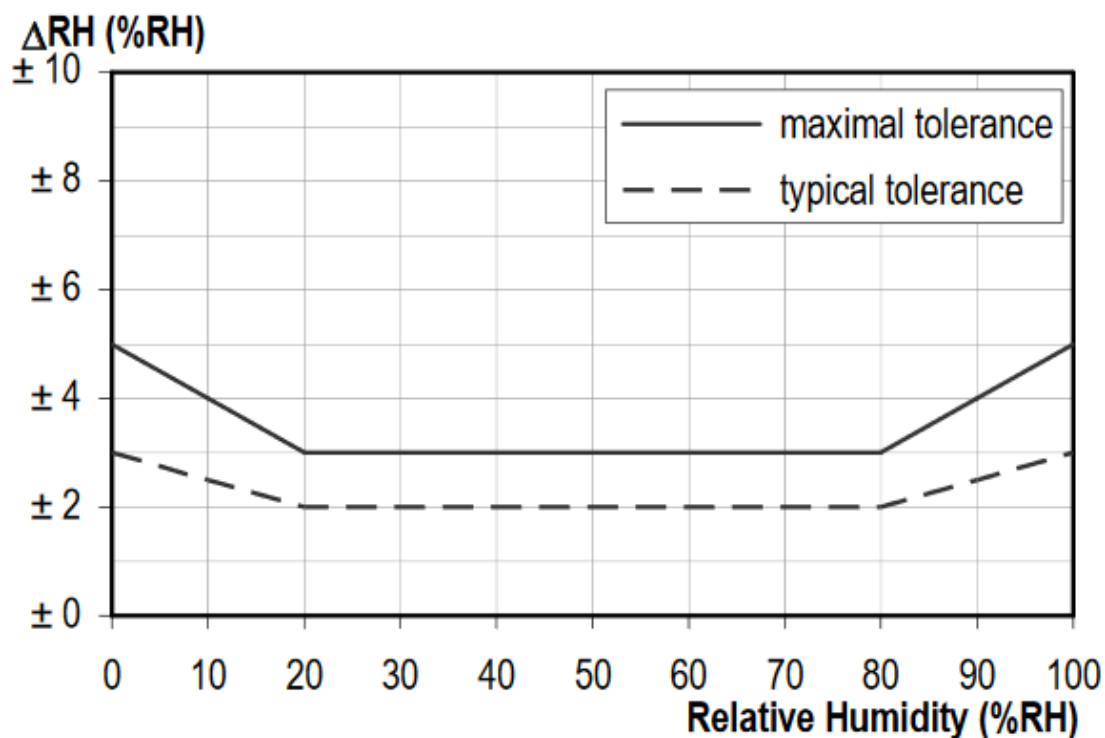
S_{RH} – proměnná hodnota vyčtená ze senzoru při měření vlhkosti

Výpočet teploty:

$$T = -46,85 + 178,572 \cdot \frac{S_T}{2^{16}} \quad [^{\circ}C] \quad (2)$$

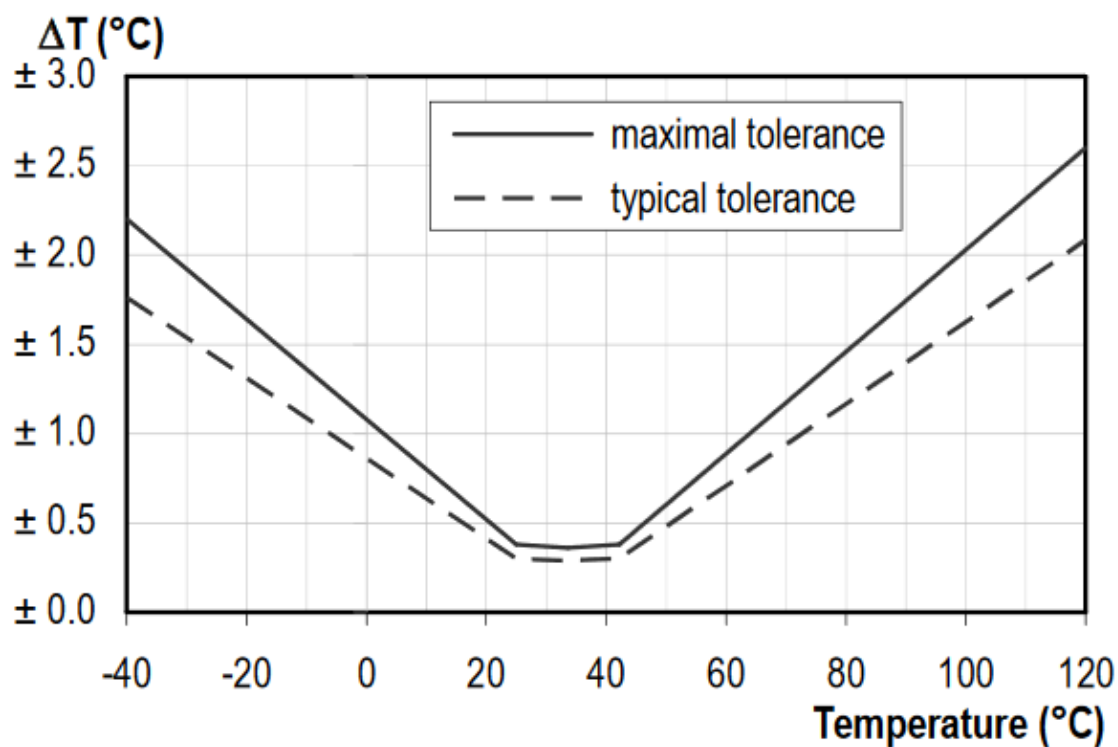
S_T – proměnná hodnota vyčtená ze senzoru při měření teploty

Měřicí rozsah teploty je $-40^{\circ}C$ až $+125^{\circ}C$. Jelikož použití jednotky je určeno k měření v běžném prostředí, je rozsah měření naprosto dostačující. Rozsah měření vlhkosti je v rozmezí 0 - 100 % RH. [25] Na obr.17 a 18 jsou zobrazeny grafy, znázorňující závislost přesnosti měření na okolních podmínkách.



Obrázek 17 : Závislost tolerance při měření vlhkosti [25]

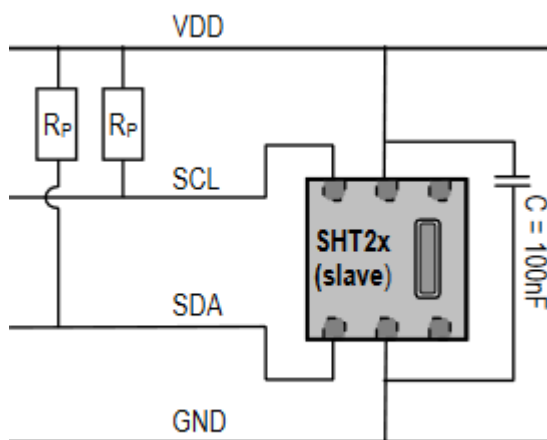
Z grafu je patrné, že nejmenší chyba měření relativní vlhkosti je v rozmezí 20-80%RH. Chyba měření v tomto rozsahu je maximálně 3%. Maximální chyba mimo uvedený rozsah je 5%.



Obrázek 18 : Závislost tolerance při měření teploty [25]

Jak lze vidět na obrázku 18, tak senzor vykazuje při měření teploty největší přesnost v rozmezí 20-40 °C . Mimo tento rozsah chyba lineárně narůstá až do hodnoty 2,5%, což odpovídá maximální chybě měření teploty.

Senzor může být napájen v rozmezí 2,1 až 3,6V. Doporučené napětí je minimálně 3V a to z důvodu možnosti napájení doplňkového topení, které kompenzuje chybu měření relativní vlhkosti, která vlivem rostoucí teploty klesá. Spotřeba snímače při měření je 1mW a v případě měření za provozu doplňkového topení je maximálně 5.5mW. Doplňkové topení zvyšuje teploty o 0,5 - 1,5°C . Doporučené schéma zapojení je znázorněno na obr. 19. [25]



Obrázek 19 : Doporučené schéma zapojení

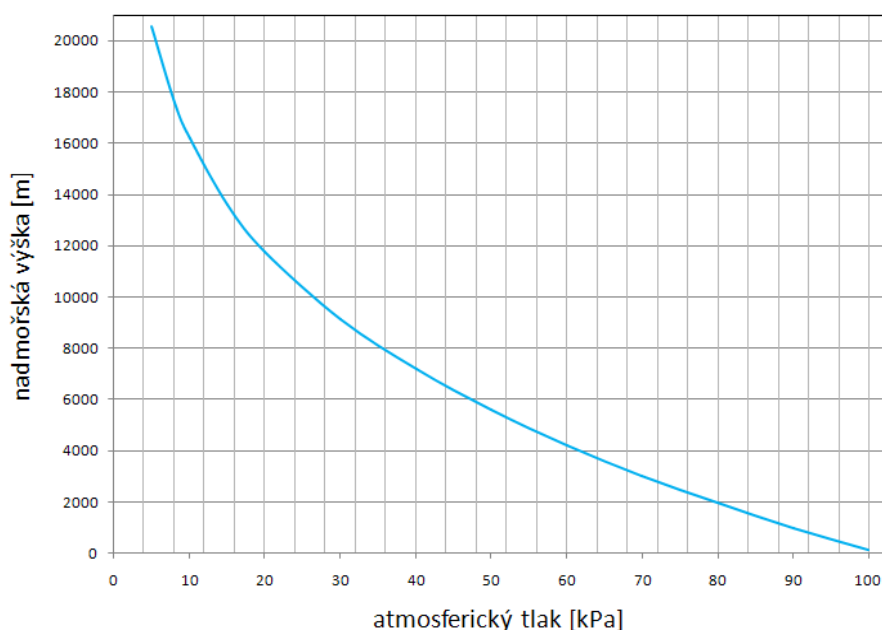
3.3 Senzor tlaku



Obrázek 20 : Senzor BMP280 [26]

Tlakové snímání funguje na piezo-rezistivním principu. Snímací membrána je hermeticky uzavřena v pouzdře senzoru. Senzor vykazuje vysokou přesnost, linearitu a dlouhodobou stabilitu. Použitý senzor pro snímání atmosférického tlaku je digitální tlakový senzor BMP280 od firmy BOSH. Senzor se vyznačuje velmi nízkou spotřebou a je proto vhodný do aplikací s bateriovým provozem. Senzor je primárně určen pro využití v mobilních telefonech, tabletech, domácích meteorologických stanicích a v GPS navigacích. Kromě snímání tlaku senzor rovněž umožňuje měření teploty. V případě realizované jednotky nebude teplota měřená tímto senzorem, ale výše uvedeným senzorem SHT21. Teplota měřená tímto senzorem však poslouží samotnému senzoru ke kalibraci a přesnějšímu měření atmosférického tlaku. [26]

Měřicí rozsah tlaku je v rozmezí 300-1100 hPa. V případě jednotky se uvažuje měření tlaku za účelem následného určení nadmořské výšky. Z obr. 21 je zřejmé že daný měřicí rozsah nám poslouží k možnosti měření tlaku v nadmořských výškách 0-9000 m.n.m. . Teplotní rozsah pro měření senzorem je v rozmezí -40°C až 85°C. [26]

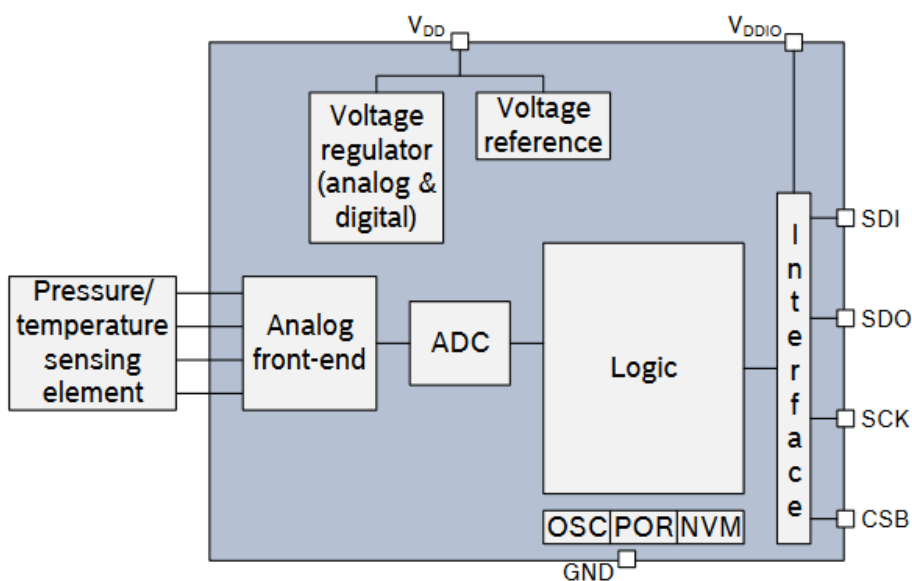


Obrázek 21 : Závislost atmosférického tlaku na nadmořské výšce [27]

Výrobce udává, že daný senzor lze použít pro měření až do úrovně -500 m pod hladinou moře. Relativní přesnost měření je $\pm 0.12 \text{ hPa}$. Po přepočtu na nadmořskou výšku se jedná o chybu asi 1m. [26] Odhad chyby v metrech je pouze orientační, jelikož závislost tlaku na nadmořské výšce se mění exponenciálně.

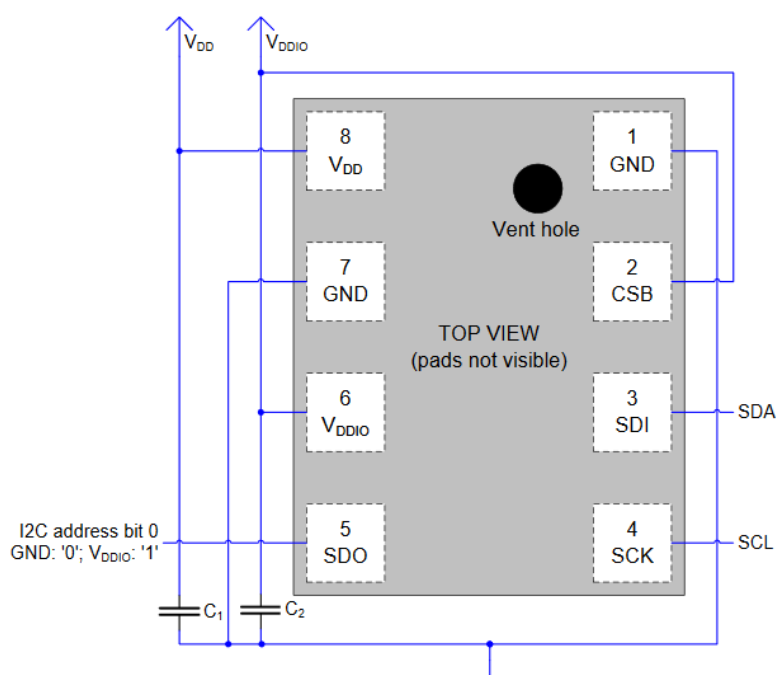
Senzor může pracovat ve třech režimech. První je režim spánku, kdy senzor neměří a čeká na probuzení. V tomto režimu je maximální spotřeba $0,3 \mu\text{A}$. Druhý režim je režim jednorázového měření, které může být externě vyvoláno, tento režim je výrobcem označován jako force režim a v případě realizované jednotky je snímač provozován právě v tomto režimu. Poslední je standardní režim měření, kde dochází k pravidelnému měření v nastavených intervalech. Režimy a frekvence měření se nastavuje pomocí nastavovacích registrů. Průměrná spotřeba při měřicí frekvenci 1Hz je $2,7 \mu\text{A}$. Kromě intervalů měření je možné také nastavit přesnost měření, která má také vliv na celkovou spotřebu senzoru. Přesnost měření tlaku je možné volit v rozmezí 16 bit až 20 bit, což odpovídá rozlišení $2,62 \text{ Pa}$ až $0,16 \text{ Pa}$. [26]

Vnitřní struktura senzoru je vidět na obr. 22. Senímač se skládá ze senzoru, bloku A/D převodu, vyhodnocovací logiky, obvodů pro napájení a nastavení přesné napěťové reference a obvodů pro připojení k vnějšímu rozhraní. [26]



Obrázek 22 : Blokové schéma senzoru BMP208 [26]

Senzor umožňuje komunikaci jak po sběrnici SPI, tak i I²C. V případě realizované jednotky senzor komunikuje prostřednictvím I²C sběrnice. Doporučené schéma zapojení senzoru na I²C sběrnici je znázorněno na obr. 23. I²C sběrnice by měla být opatřena pull-up rezistory, které zajišťují udržování jednotlivých signálů při nečinnosti v logické 1. Velikost pull-up rezistoru má vliv na maximální rychlost sběrnice a její proudovou spotřebu. S rostoucí velikostí odporu dochází ke snižování maximální dostupné rychlosti sběrnice, ale zároveň ke snižování proudové spotřeby. V realizované jednotce jsou pro I²C sběrnici využívány pull-up rezistory umístěné na modulu pro měření kvality ovzduší.



Obrázek 23 : Doporučené schéma zapojení pro I²C [26]

3.4 Senzor kvality vzduchu

Pro měření koncentrace CO₂ ve vzduchu je využíván senzor iAQ-Core od firmy AMS. Senzor umožňuje kromě měření CO₂ také měření koncentrace těkavých látek ve vzduchu (TVOC – total volatile organic compounds). Je primárně určen k měření kvality vzduchu ve vnitřních prostorech. Jeho provozní teplota se pohybuje v rozmezí 0-50°C. Samotný senzor je chráněn plastovým pouzdem a je zakryt filtrační membránou, která nesmí být poškozena. Rozsah měření TVOC je v rozmezí 125-600 ppb, zatímco rozsah měření koncentrace CO₂ je 450-2000 ppm. [28] V tabulce č.2 jsou uvedeny hodnoty a poznámky k vlivu koncentrace CO₂ na člověka. Z tabulky je zřejmé, že použitý rozsah měření CO₂ ve vnitřních prostorech je dostatečný.

Tabulka 2 : Vliv oxidu uhličitého na člověka [18]

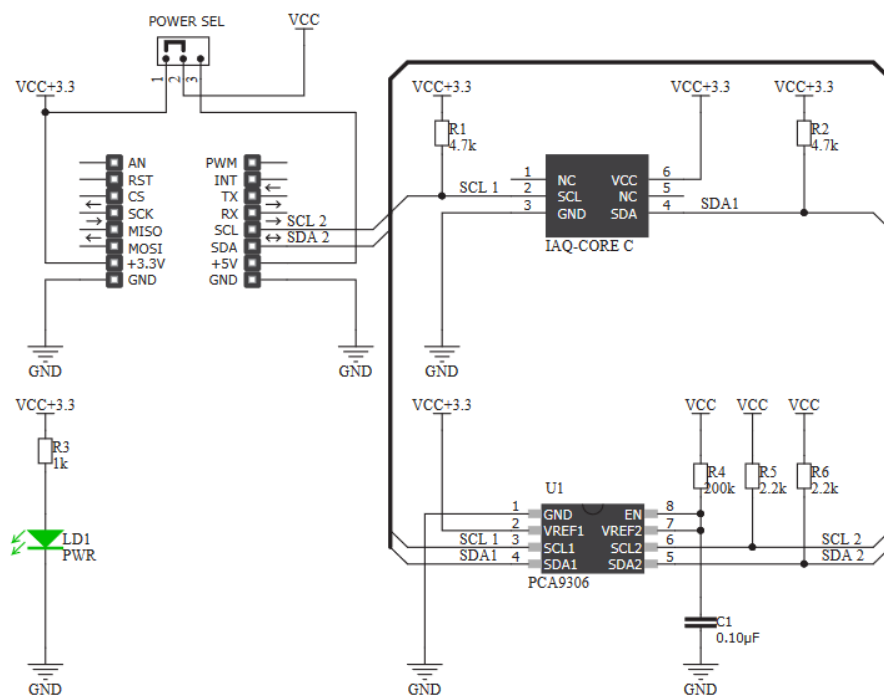
Koncentrace CO ₂ [ppm]	Komentář
<400	Koncentrace ve venkovním vzduchu
<1000	Doporučená koncentrace v uzavřeném prostoru
<1500	Maximální doporučená koncentrace v uzavřeném prostoru
>1500	Příznaky únavy, snižování koncentrace, letargie
>5000	Příznaky nevolnosti, bolest hlavy, zvýšený tep

V realizované jednotce je použit modul od firmy Mikroelektronika, který je osazen čidlem iAQ-Core a dalšími obvodovými prvky. Modul nese označení Air quality 2 click. Na obr. 24 je znázorněn vybraný modul. V horní části modulu jde vidět snímač iAQ-Core v černém plastovém pouzdře s bílou filtrační membránou.



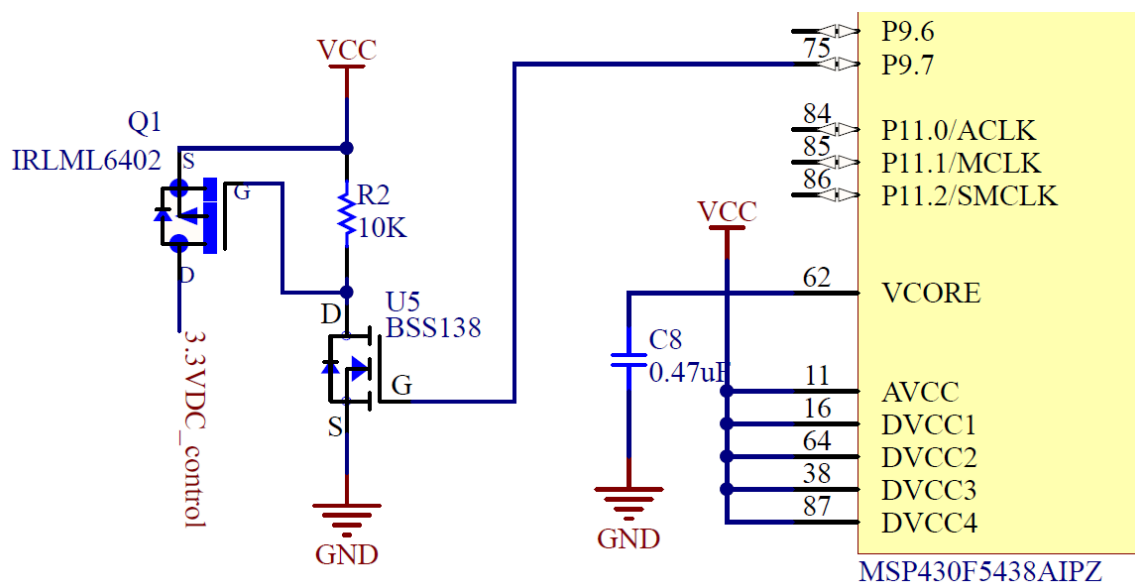
Obrázek 24 : Modul Air quality 2 click [29]

Na obr. 25 je znázorněno schéma zapojení modulu. Ze schématu je patrné, že obvod je opatřen pull-up rezistory s hodnotou 4,7 k Ω . Tyto pull-up rezistory poslouží rovněž pro ostatní senzory na sběrnici I²C, jelikož všechny další senzory jsou k vodičům SDA a SCL připojeny paralelně. Modul je dále opatřen diodou, která indikuje přítomnost napájecích napětí a obvodem PCA9306, který funguje jako I²C obousměrný převodník napětíových úrovní.



Obrázek 25 : Schéma zapojení Air quality 2 click [29]

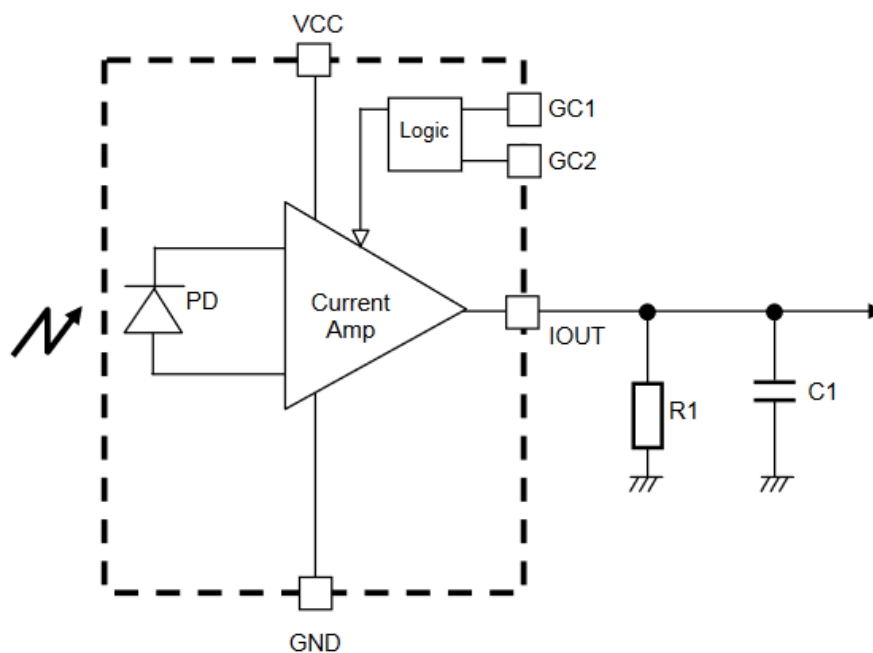
Senzor využívá snímač pracující na principu polovodičového snímače, jehož princip je popsán v kapitole zabývající se měřením oxidu uhličitého. Provozní napětí senzoru je 3,3V a výkonová spotřeba je maximálně 66mW. V porovnání s jinými použitými senzory je tato výkonová spotřeba největší a je způsobena potřebou vyhřívání substrátu uvnitř senzoru. K nahřátí senzoru až na úroveň, kdy je senzor schopný přesného měření dochází po 5 minutách. [28] Z důvodu šetření výkonové spotřeby celého zařízení, dochází k měření oxidu uhličitého pouze jednou za hodinu. Po dobu nečinnosti je napájení senzoru odpojeno. Odpojování napájení je realizováno pomocí dvou P-MOSFET a N-MOSFET tranzistorů ovládaných pinem P9.7 na mikropočítači. Schéma zapojení ovládání napájení senzoru MOSFET tranzistory je znázorněno na obr. 26. Řízené napájení pro senzor je ve schématu označeno jako 3,3VDC_control.



Obrázek 26 : Schéma zapojení pro řízení napájení senzoru CO₂

3.5 Senzor intenzity světla

V realizované jednotce se jedná o jediný senzor s analogovým výstupem. Použitý senzor pro snímání intenzity světla je BH1603 od firmy ROHM Semiconductor. Provozní napětí senzoru je od 2,4 do 5V a maximální spotřeba je 94 μ A. Hlavním snímacím prvkem je fotodiody, jejíž princip činnosti je popsán v kapitole zabývající se snímáním intenzity světla. Na obr. 27 je zobrazeno vnitřní zapojení senzoru. Signál z fotodiody je dále zesilován operačním zesilovačem. Zesílení operačního zesilovače lze nastavit pomocí logické kombinace pinů GC1 a GC2. [30]



Obrázek 27 : Vnitřní schéma zapojení BH1603 [30]

Kombinaci logických úrovní na pinech GC1 a GC2 vyhodnocuje vnitřní logický blok a na základě jejího výsledku je nastaveno zesílení vnitřního zesilovače. Na senzoru lze nastavit 4 režimy zesílení, jež mají přímý vliv na citlivost a rozsah senzoru. V tab. 3 je uvedeno nastavení režimu snímače.

Tabulka 3 : Nastavení citlivosti snímače BH1603 [30]

GC1	GC2	Režim	Rozsah
0	0	Vypnuto	-
1	0	H-Gain	~1000 lx
0	1	M-Gain	~10 000 lx
1	1	L-Gain	~100 000 lx

Rovnice pro určení výstupního napětí v režimu H-Gain:

E_V – intenzita dopadajícího světla

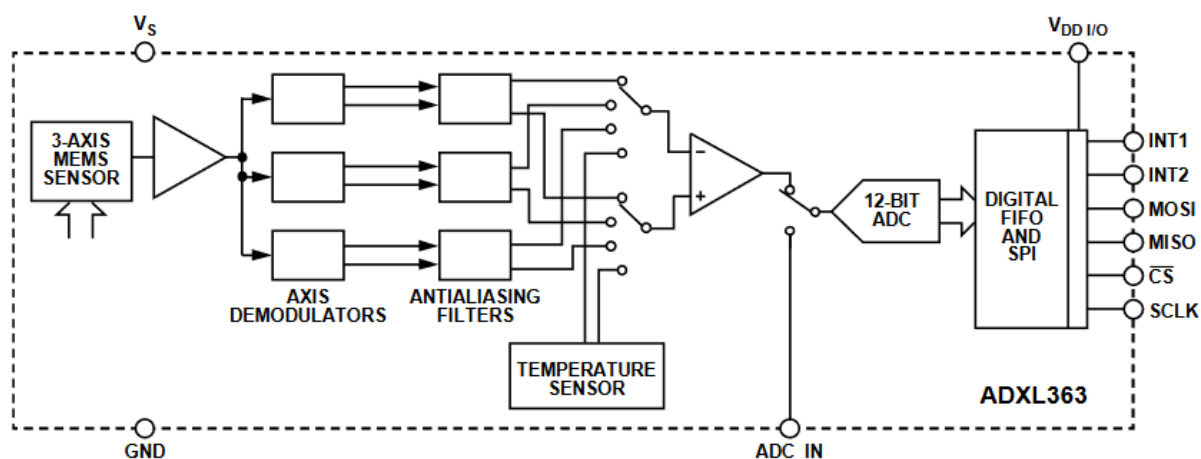
 R_1 – výstupní odpor

The diagram illustrates the internal circuit of the BH1603* LED driver. The IC is represented by a yellow box with pins 1 (IOUT), 2 (GND), and 3 (VCC). Pin 1 is connected to a 10K resistor (R1) and a 4700pF capacitor (C6) to ground. The LIGHT pin is connected to the junction of R1 and C6. The diagram also shows connections to various pins of the IC, including P7.2/TB0OUTH/SVMOUT, P7.3/TA1.2, P7.4/A12, P7.5/A13, P7.6/A14, P7.7/A15, P9.0/UCB2STE/UCA2CLK, P9.1/UCB2SIMO/UCB2SDA, P9.2/UCB2SOMI/UCB2SCL, P9.3/UCB2CLK/UCA2STE, P9.4/UCA2TXD/UCA2SIMO, P9.5/UCA2RXDUCA2SOMI, P9.6, and P9.7.

3.6 Senzor otřesu

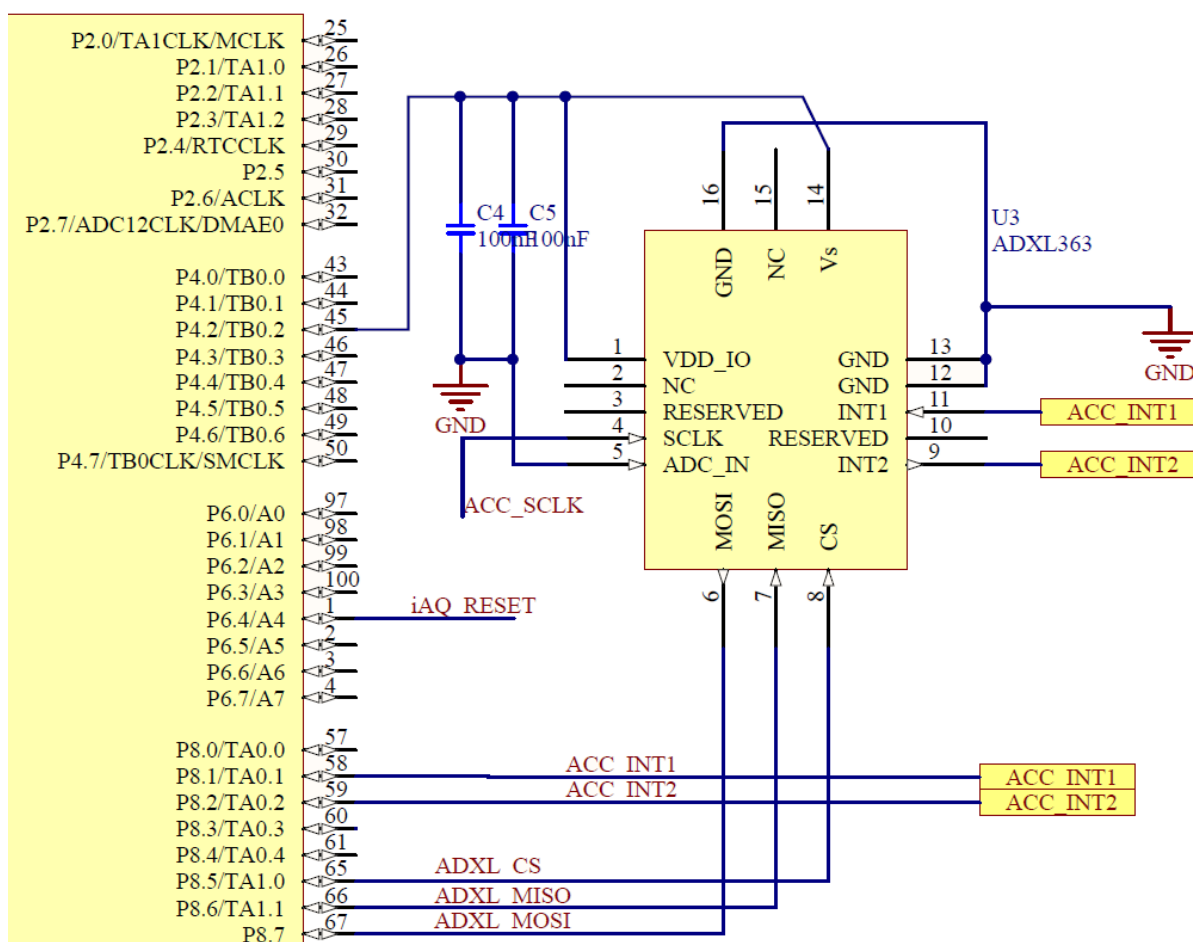
41

může přepínat mezi třemi režimy. První režim je režim kontinuálního měření, kdy senzor neustále v pravidelných intervalech měří a posílá data, v tomto režimu vykazuje senzor největší proudovou spotřebu, která při napájení 2V činí 3,5μA. Druhý režim je wake-up. Tento režim se používá v případě, kdy se má detekovat občasný pohyb, tzn. většinu času je senzor bez pohybu a v momentě vyhodnocení pohybu dojde k jeho probuzení a k odeslání naměřených dat. Jedná se o velice úsporný režim, kdy proudová spotřeba je asi 270 nA (při 2V). Poslední režim je režim spánku, kdy senzor čeká na externí probuzení. Na obr. 29 je znázorněno funkční blokové schéma senzoru, kde je patrné, že kromě měření pohybu umožňuje senzor i měření teploty. Senzoru teploty, není v realizované jednotce využíváno. [31] V realizované jednotce pracuje senzor v režimu wake-up. Při detekci zrychlení dojde ke změně logické úrovně na pinu INT2 z úrovně L na úroveň H.

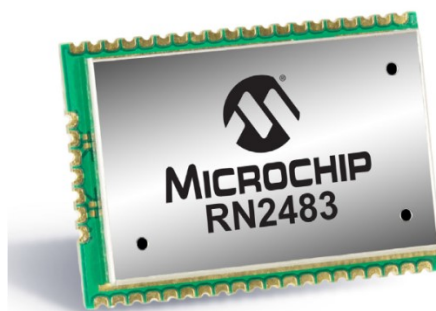


Obrázek 29 : Blokové schéma senzoru ADXL363 [31]

Jak lze vidět na obrázku, tak obvod ADXL363 nemusí sloužit pouze jako akcelerometr a teplotní senzor, ale lze i využívat 12-bitového A/D převodníku, který může digitalizovat externí analogový signál přivedený na pin ADC_IN. Obvod komunikuje s okolím prostřednictvím SPI sběrnice.[30] V realizované jednotce se jedná o jedinou periférii, která je k mikropočítači připojena prostřednictvím SPI. Na obr.30 je znázorněno schéma zapojení snímacího obvodu k mikropočítači.

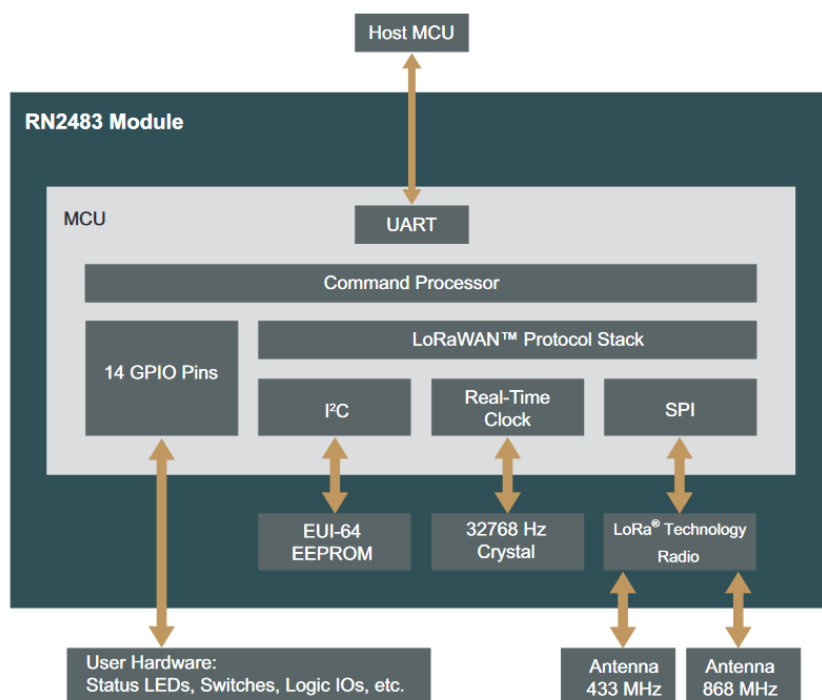


3.7 Komunikační modul LoRa



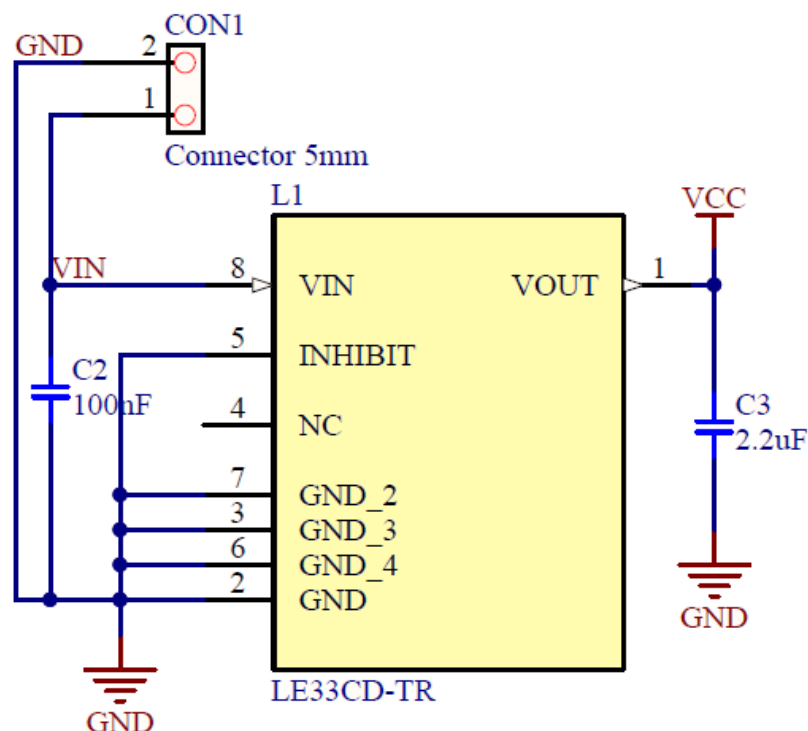
Pro komunikaci v síti LoRa je použit modul RN2483 od firmy Microchip. Jedná se o plně certifikovaný modul umožňující bezdrátový přenos na frekvenci 434MHz a 868MHz. V případě realizované jednotky, bude vysílat na frekvenci 868MHz. Modul pracuje podle kritérií LoRa aliance v klasifikační třídě A, tzn., že komunikace s okolím je pouze v režii koncového zařízení a po odeslání zprávy očekává případnou odpověď základnové stanice, více o provozu v třídě A je uvedeno

v kapitole zabývající se LoRa standardem. Realizuje spread-spectrum LoRa modulaci, díky které je možno dosáhnout velkých vysílacích frekvencí za potřeby minimálního vysílacího výkonu. Modul je podporován LoRa aliancí a jeho primární využití je uvažováno pro komunikaci v síti LoRa. Umožňuje taky komunikaci mimo LoRa síť a to jako machine to machine, tzn., že zařízení osazena těmito moduly mohou spolu komunikovat napřímo, mimo vybudovanou LoRa infrastrukturu. Kromě LoRa modulace umožňuje tak modulaci FSK a GFSK. Citlivost přijímače je -146 dBm a maximální vysílací výkon je +14 dBm. Maximální spotřeba modulu při vysílání je 38,9 mA při napájecím napětí 3,3V. Na obr. 32 je znázorněno vnitřní blokové schéma modulu. Modul navíc disponuje 14 vstupně/výstupními porty, díky kterým, je možné přímo modulem ovládat další hardwarové rozhraní jako jsou např. spínače, LED diody, případně na základě vstupních hodnot upravovat činnost modulu. [32]



Obrázek 32 : Blokové schéma modulu RN2683 [32]

Modul má integrovaný vlastní mikropočítač, který řídí chod celého modulu. V modulu je integrovaný LoRaWAN komunikační protokol, který značně usnadňuje implementaci zařízení do sítě. Modul je s hlavním mikropočítačem propojen prostřednictvím UART. Ovládání činnosti modulu je realizováno pomocí AT příkazů. Modulu je tedy odeslán AT příkaz, který je vyhodnocen příkazovým procesorem a integrovaný procesor za pomoci vlastních periférií příkaz vykoná. [30] Na obr. 33 je znázorněno schéma zapojení modulu v realizované jednotce.



Obrázek 34 : Schéma zapojení napěťového regulátoru LE33C

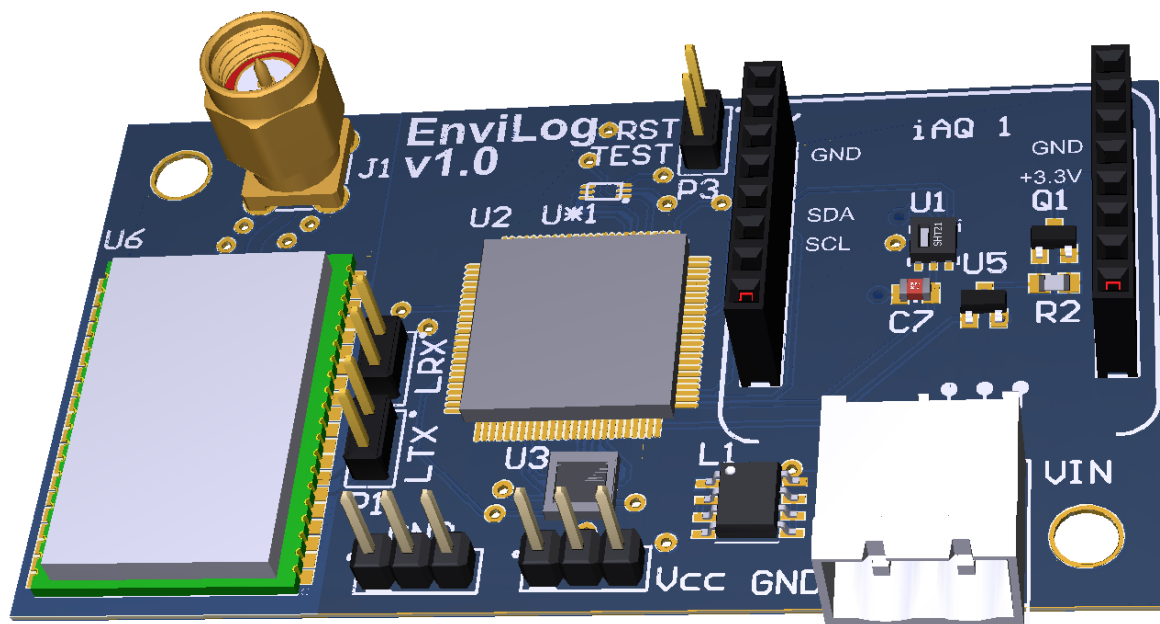
Vstupní napětí je přiváděno na konektor označený CON1. Na těchto pinech je trvale připojena Li-Pol baterie, která napájí celou jednotku. Li-Pol baterie byla vybraná z důvodu možnosti dobíjení a jejím vhodným rozměrům pro kompaktnost celého mobilního řešení environmentální jednotky. Maximální napětí baterie při plném nabití je 4,2V. Přivedením externího napětí na konektor CON1 s úrovní 4,2V dojde k nabíjení baterie. Při používání Li-Pol baterií je důležité dbát na to, aby nedošlo k jejich přečerpání a tak k nevratnému poškození baterie. Hlídání přečerpání baterie je realizováno samostatnou funkční jednotkou, která je již přímo mechanicky i elektricky připojena k bateriovým článkům. Použitá baterie má kapacitu 12.95Wh, což by mělo umožnit provoz jednotky po dobu minimálně 3 měsíců. Průměrná výkonová spotřeba zařízení je 5,5mW.

3.9 Celkové schéma zapojení

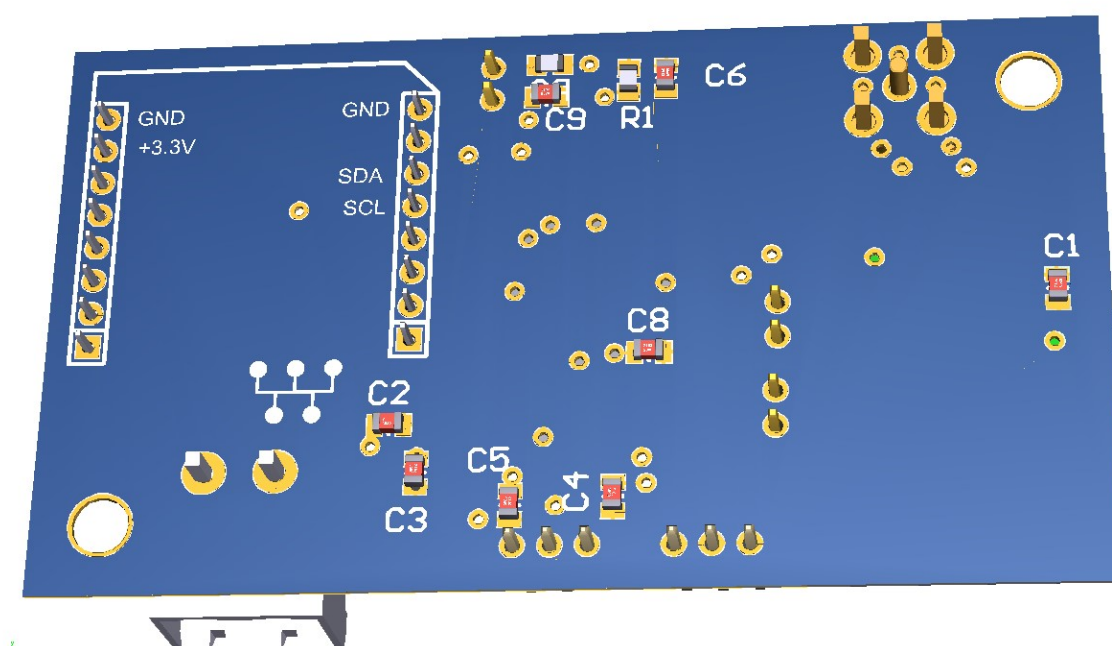
Na základě všech výše uvedených zapojení periférií a dalších doplňujících obvodů bylo vytvořeno celkové schéma zapojení, které je součástí přílohy diplomové práce. Z navrženého schéma zapojení byla následně navržena deska plošných spojů.

3.10 Deska plošných spojů

Návrh desky plošných spojů byl realizován v návrhovém programu Altium. Z konstrukčního hlediska se jedná o dvouvrstvou desku, s mechanickými rozměry 74 x 42 mm. Deska má dva montážní otvory pro případ nutnosti pevného upevnění. Deska je pokryta zelenou nepájivou maskou s bílým potiskem pro usnadnění osazování součástkami. Na obr. 35 a 36 je zobrazen 3D model navržené desky, včetně osazených součástek.



Obrázek 35 : 3D model osazené DPS (strana TOP)



Obrázek 36 : 3D model osazené DPS (strana BOTTOM)

Z důvodu přítomnosti komunikačního modulu, který vysílá vysokofrekvenční signál, bylo potřeba dbát impedančního přizpůsobení cesty k SMA konektoru, na který je připojena externí anténa. K definování přesných rozměrů a pravidel pro ideálně impedančně přizpůsobené cesty byl použit program AppCAD, konkrétně funkce výpočtu planárního vlnovodu. Na obr. 37 jsou zobrazeny vypočtené hodnoty pro návrh VF vedení na materiálu FR-4 pro frekvenci 868 MHz s impedancí vedení 50Ω.

Coplanar Waveguide

☒ With Groundplane ☐ No Groundplane

Diagram labels: L (500), T (0.018), H (1.6), εr, W (0.9), G (0.155).

Calculate Z0 [F4]

Z0 = **50.0** Ω

Elect Length = 2.385 λ

Elect Length = 858.5 degrees

Elect Length = 823.649 mm (Air Line equiv.)

Delay = 2.747 ns

1.0 Wavelength = 209.666 mm

Vp = 0.607 fraction of c

εeff = 2.71

Shape factor = 0.744

Dielectric: εr = 4.6

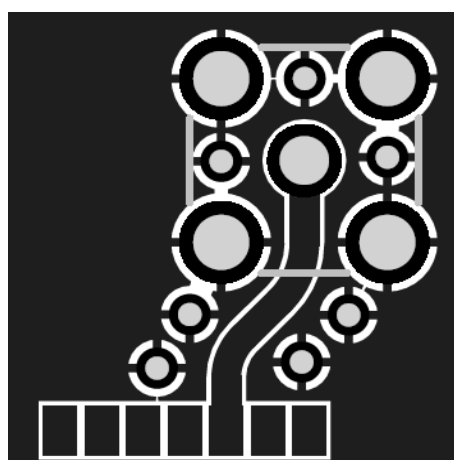
FR-4

Frequency: 868 MHz

Length Units: mm

Obrázek 37: Simulace návrhu VF vedení

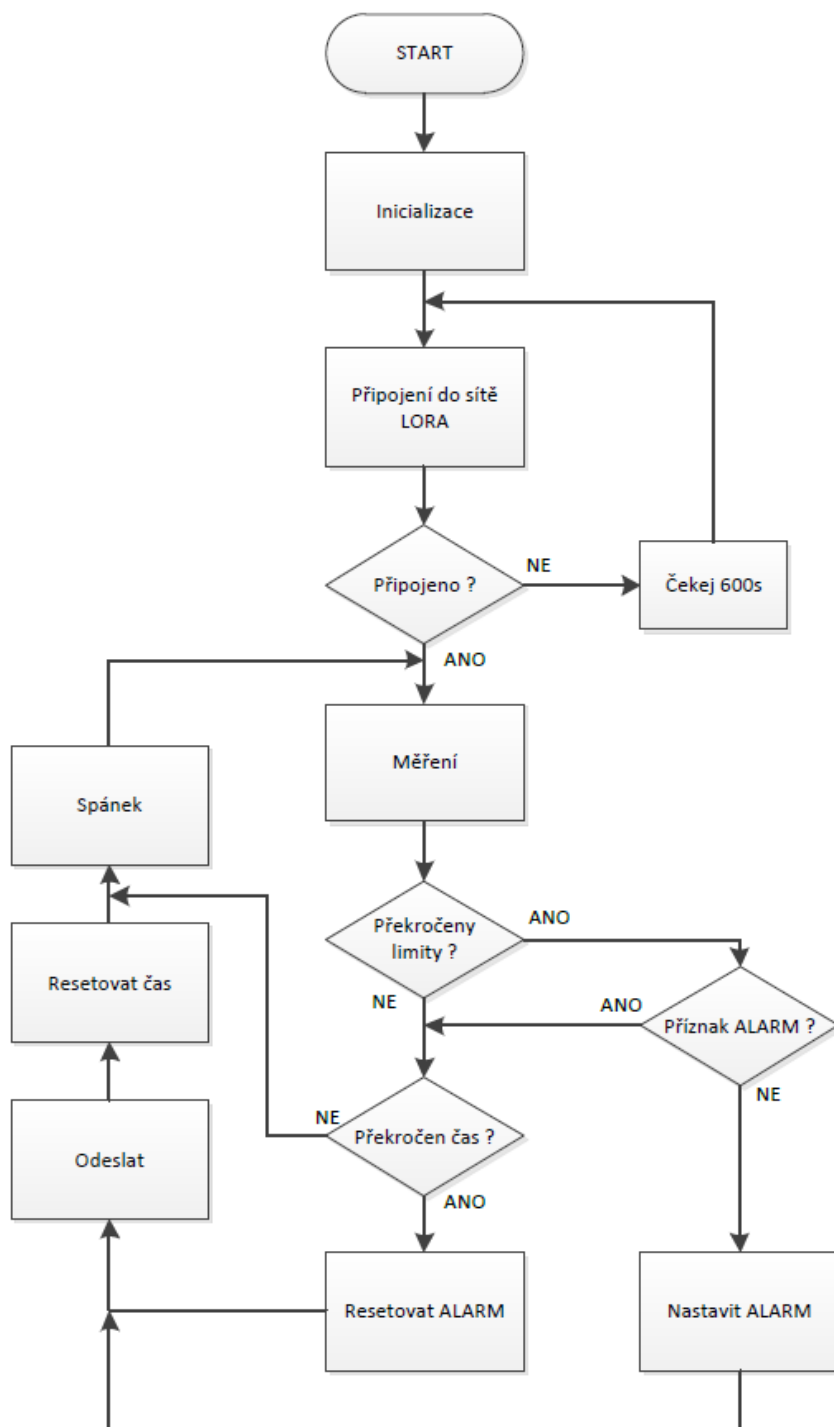
Navržené VF vedení kromě vypočtených parametrů je ještě navíc odstíněno od okolních obvodů řadou prokůvů, z důvodu zamezení negativního VF rušení ostatních částí DPS. Na obr. 38 je zobrazeno navržené vedení ke konektoru antény, včetně stínících prokůvů.



Obrázek 38 : Přizpůsobené VF vedení na DPS

3.11 Firmware

Program, byl navržen v programátorském prostředí Code Compser Studio (CCS), který slouží primárně k ladění programů pro mikropočítače firmy Texas Instruments. Celý program je součástí příloh práce. Firmware mikropočítače se skládá z hlavního programu a z několika knihoven, které zajišťují činnost sběrnic, senzorů a dalších periférií. Činnost hlavního programu je znázorněna ve vývojovém diagramu na obr. 39.



Obrázek 39 : Vývojový diagram hlavního programu

V první fázi programu dochází k inicializaci všech sběrnic a periférií. Po inicializaci následuje pokus o připojení do sítě LoRa, v případě, že se připojení nezdaří, dojde k čekání 600s a následně k opakovanému pokusu o připojení do sítě. Pokud by nedošlo k časové prodlevě mezi jednotlivými pokusy o připojení, mohla by základnová stanice, ke které se snaží jednotka připojit, vyhodnotit zařízení jako poruchové a zablokovat mu přístup do sítě. Po úspěšném připojení do sítě dochází k měření jednotlivých veličin. Změřené hodnoty jsou následně vyhodnoceny a porovnány s nastavenými kritickými hodnotami. Pokud jsou limitní hodnoty překročeny, dochází k zjištění, zda mají naměřená data již příznak ALARM. Pokud nemají příznak ALARM, tak jim je přiřazen a data jsou ihned odeslána na server. Pokud již byla data s příznakem ALARM, přechází program do fáze kontroly časovače. Pokud je čas čekání překročen, jsou data odeslána, pokud ne, přechází do režimu spánku. Po odeslání dat dochází k resetování času a přechodu do režimu spánku. Po probuzení dochází k novému měření a celý cyklus se znovu opakuje.

Z důvodu delší doby zahřívání senzoru kvality ovzduší je příznak ALARM u kvality ovzduší aktivní až po prvních pěti minutách provozu senzoru. Pokud by nebyla zavedena tato ochranná lhůta, došlo by k odeslání alarmového příznaku z důvodu velké chyby měření, ke které dochází při nedostatečném zahřátí substrátu.

Všechny zdrojové kódy jsou součástí elektronické přílohy uložené v IS EDISON.

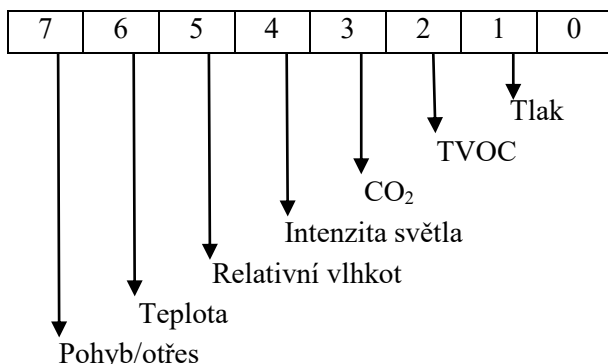
3.12 Odesílané data

Velikost odesílaných užitečných naměřených dat na server je 16 B. Každý bajt, odpovídá naměřené hodnotě jednotlivých veličin, případně doplňujících informací, jako je např. příznak alarm. Detailní popis využití jednotlivých bajtů je uveden pod obr. 40, který označuje číslování jednotlivých bajtů.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----

Obrázek 40 : Číslování bajtů odesílaných dat

0. bajt – STATUS bajt se skládá z osmi bitů a každý jednotlivý bit, který bude v úrovni H, bude značit příznak ALARM. Posloupnost ALARM bitů pro jednotlivé veličiny odpovídá posloupnosti přiřazených bajtů jednotlivým veličinám.



Obrázek 41 : ALARM bajt

1. bajt – POHYB/OTŘES - bajt nabývá pouze dvou hodnot, buďto jsou všechny jeho bity v úrovni H a jsou detekovány otřesy, nebo je v úrovni L a jednotka je v klidu, bez pohybu.

2. a 3. bajt – TEPLOTA – hodnota bajtu převedena do dekadické soustavy odpovídá desíti násobku reálné teploty. Měření teploty probíhá s přesností na jednu desítnu °C. Pokud je tedy hodnota bajtů například 265, pak to odpovídá teplotě 26,5 °C.

4. bajt – RELATIVNÍ VLHKOST – bajt nabývá hodnoty 0-100 a hodnota bajtu přímo odpovídá naměřené hodnotě relativní vlhkosti v procentech.

5. bajt – INTENZITA SVĚTLA – hodnota bajtu odpovídá intenzitě světla v rozsahu 0-100%

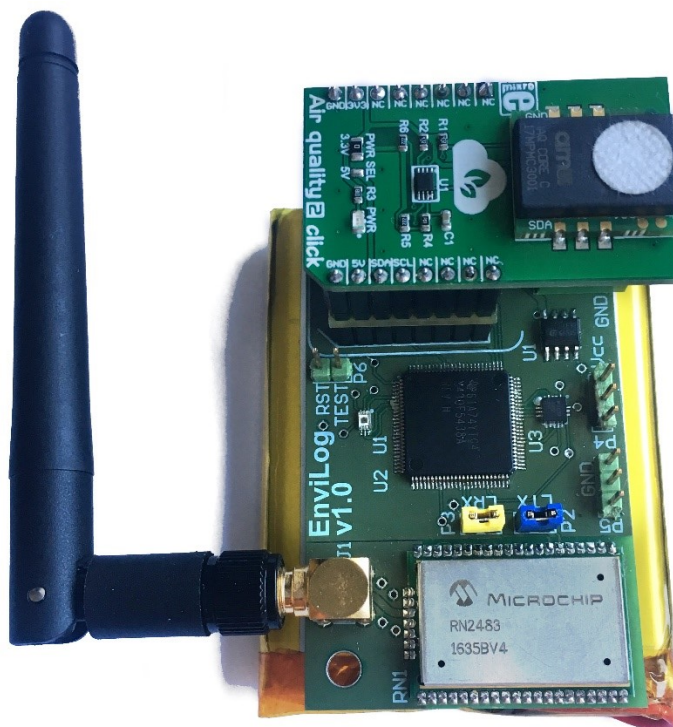
6. a 7. bajt – CO₂ - bajt nabývá hodnot 450-2000 a hodnota bajtu přímo odpovídá naměřené koncentraci oxidu uhličitého v ppm.

8. a 9. bajt – TVOC – bajt nabývá hodnoty 125-600 a hodnota bajtu přímo odpovídá naměřené koncentraci těkavých látek v ppb.

10. a 11. bajt – TLAK - bajt nabývá hodnot 0 až 44 465. Maximální změřený tlak může dosahovat hodnot až 1 10 000 Pa. Tuto hodnotu není možné přenést dvěma bajty, proto je změřená hodnota v procesoru snížena o hodnotu 2¹⁶. Při vyhodnocení dat na straně uživatele je pro obnovení měřené hodnoty v Pa nutno opětovně tuto hodnotu přičíst.

3. Testování jednotky v reálných podmínkách

V následující kapitole je popsáno testování funkčnosti realizovaného prototypu. Funkčnost jednotky byla otestována na třech různých místech v celé ČR. Měření v různých částech republiky bylo realizováno z důvodu demonstrace pokrytí sítě LoRa na celém našem území.



Obrázek 42 : Testovaný prototyp

Při testování byla jednotka nastavena do režimu odesílání dat v pravidelném intervalu 15 minut. Zprávy byly pravidelně odesílány na všechny dostupné základnové stanice ČRa a následně byly zpřístupněny na serveru, kde byl založený bezplatný testovací účet. Účet slouží k správě přijatých zpráv na serveru ČRa. Pro spárování zařízení s uživatelským účtem, bylo zapotřebí nastavit na serveru i testovaném zařízení schodné DevEUI (identifikátor zařízení), DevAddr (adresa zařízení) a NwkSKey (síťový klíč). Po úspěšném přiřazení zařízení do sítě LoRaWAN došlo k přijímání dat na uživatelský účet. Shromážděné zprávy přijaté z testovaného zařízení je možné ze serveru stáhnout v souboru s příponou .csv. Při exportu dat si může uživatel zvolit, pro jaký časový úsek chce data exportovat.

3.1 Tvar přijaté zprávy

Zpráva přijatá na server obsahuje kromě odesílaných užitečných dat, také množství doplňujících informací, například o provozu a stavu sítě. V této kapitole je podrobněji popsán obsah přijaté zprávy.

Přijatá zpráva :

```
{ "c": { "cmd": "gw", "seqno": 84808841, "EUI": "ABBA01DE71AE09EA", "ts": 1555698795606, "fcnt": 1, "port": 1, "freq": 868500000, "toa": 66, "dr": "SF7BW125 4/5", "ack": false, "gws": [ { "rssi": -97, "snr": 7, "ts": 1555698795606, "time": "2019-04-19T18:33:15.603748Z", "gweui": "B827EBFFFF4DF4FF", "lat": 50.25640199999999, "lon": 14.511759999999998 } ] }, "bat": 255, "data": "000000B5183001d2008284a900000000" }
```

Popis zprávy :

"cmd": "gw" – příkaz gateway – konstatní úvod všech zpráv

"seqno": 84808841 - sekvenční číslo zprávy je 84808841

"EUI": "ABBA01DE71AE09EA – identifikátor zařízení je ABBA01DE71AE09EA

"ts": 1555698795606 – časová známka, udává čas přijaté zprávy ve formátu unixového času, který odpovídá počtu sekund uplynulých od 00:00:00 1.ledna 1970

"fcnt": 1 – frame counter – v testované jednotce je hodnota konstatní

"port": 1, – logické rozdělení odesílaných dat – v testované jednotce jsou data pouze v bloku port 1

"freq": 868500000 – frekvence na které byla zpráva odeslána je 868.5MHz

"toa": 66 – time of arrival – doba přenosu zprávy byla 66ms

"dr": "SF7 BW125 4/5" – informace o přenosu zprávy – Spred Factor = 7, šířka pásma 125kHz

"ack": false – koncové zařízení nežádá odpověď po přijetí

"gws" – zde následují informace o všech základnových stanicích, které zprávu přijaly

"rssi": -97 – úroveň přijatého signálu je -97 dBm

"snr": 7 – odstup signál šum je 7 dBm

"ts": 1555698795606 – časová známka ve formátu unixového času

"time": "2019-04-19T18:33:15.60 – datum a čas v UTC

"gweui": "B827EBFFFF4DF4FF" – identifikátor základnové stanice je B827EBFFFF4DF4FF

"lat": 50.25640199999999, "lon": 14.511759999999998 – informace o přesné lokaci základnové stanice

"bat": 255 – stav baterie – v testované jednotce není této informace využíváno

"data": "000000B5183001d2008284a900000000" – užitečná naměřená data

3.2 Určení naměřených hodnot

V této kapitole je popsán princip odvození naměřených veličin z přijatých dat. Pro demonstraci odvození naměřených veličin jsou použita data z výše uvedené zprávy. Jednotlivé hodnoty bajtů, které odpovídají naměřeným veličinám, jsou pro lepší orientaci barevně vyznačeny.

Přijatá data : 000000b5183001d2008284a900000000

0. bajt = 00 – žádná měřená veličina nepřekročila kritickou hodnotu – není příznak ALARM.

1. bajt = 00 – akcelerometr nevyhodnotil pohyb.

2. a 3. bajt = 00B5 – po převodu na decimální soustavu je hodnota bajtů 181, pro určení teploty, je potřeba tuto hodnotu ještě podělit desíti a změřená teplota je 18,1°C.

4. bajt = 18 – po převodu na decimální soustavu je hodnota bajtu 24, naměřená vlhkost je 24% RH.

5. bajt = 30 – po převodu na decimální soustavu je hodnota bajtu 48, to odpovídá intenzitě světla o úrovni 48%.

6. a 7. bajt = 01d2 - po převodu na decimální soustavu je hodnota bajtů 466, koncentrac CO₂ ve vzduchu je tedy 466 ppm.

8. a 9. bajt = 0082 - po převodu na decimální soustavu je hodnota bajtů 130, koncentrace TVOC ve vzduchu je tedy 130 ppb.

10. a 11. bajt = 84a9 – po převodu na decimální soustavu a přičtení 65535 vyjde hodnota 99496, to odpovídá tlaku v Pa, a pro přepočtení do hPa je ještě potřeba podělit stem. Změřený atmosférický tlak je tedy 994.96 hPa.

3.3 Měření v reálných podmínkách

V této kapitole jsou zpracovány výsledky měření, které bylo provedeno v různých lokalitách ČR. Kromě naměřených veličin jsou k jednotlivým lokalitám přiloženy i obrázky map, na kterých jsou označeny jednotlivé základnové stanice a místa měření.

3.3.1 Lokalita – Praha

První měření bylo realizováno v hlavním městě ČR. Měřicí jednotka byla umístěna na autobusové zastávce.

Přijatá zpráva :

```
{"cmd":"gw","seqno":84203879,"EUI":"ABBA01DE71AE09EA","ts":1555505469649,"fcnt":1,"port":1,"freq":867500000,"toa":66,"dr":"SF7 BW125 4/5","ack":false,"gws":[{"rssi":-109,"snr":2.5,"ts":1555505469662,"time":"2019-04-17T12:51:09.487998Z","gweui":"647FDAFFFF0069D0","lat":50.12941439999999,"lon":14.4513198}, {"rssi":-112,"snr":-3.5,"ts":1555505469649,"time":"2019-04-17T12:51:09.645561Z","gweui":"FCC23DFFFF0E6C9B","lat":50.081049368533456,"lon":14.451142498672425}, {"rssi":-113,"snr":-0.5,"ts":1555505469667,"tmms":2000,"time":"2019-04-17T12:51:10.591961159Z","gweui":"647FDAFFFF006997","lat":50.0164118,"lon":14.4510954}, {"rssi":-116,"snr":-6,"ts":1555505469678,"time":"2019-04-
```


3.3.2 Lokalita – Obříství

Obec Obříství se nachází ve Středočeském kraji, v okrese Mělník. Měřicí jednotka byla umístěna v dětském pokoji rodinného domu.

Přijatá zpráva :

```
{"cmd":"gw","seqno":84840092,"EUI":"ABBA01DE71AE09EA","ts":1555709035547,"fcnt":1,"port":1,"freq":867500000,"toa":66,"dr":"SF7 BW125 4/5","ack":false,"gws":[{"rssi":-105,"snr":6.5,"ts":1555709035547,"time":"2019-04-19T21:23:55.543746Z","gweui":"B827EBFFFF4DF4FF","lat":50.25640199999999,"lon":14.511759999999981}],{"bat":255,"data":"000000e429110288030685A700000000"}
```

Čas měření : 19.04.2019, 23:23:55

Naměřené veličiny:

ALARM – žádný

POHYB – žádný

TEPLOTA : 22,8 °C

VLHKOST : 29 % RH

INTENZITA SVĚTLA : 17 %

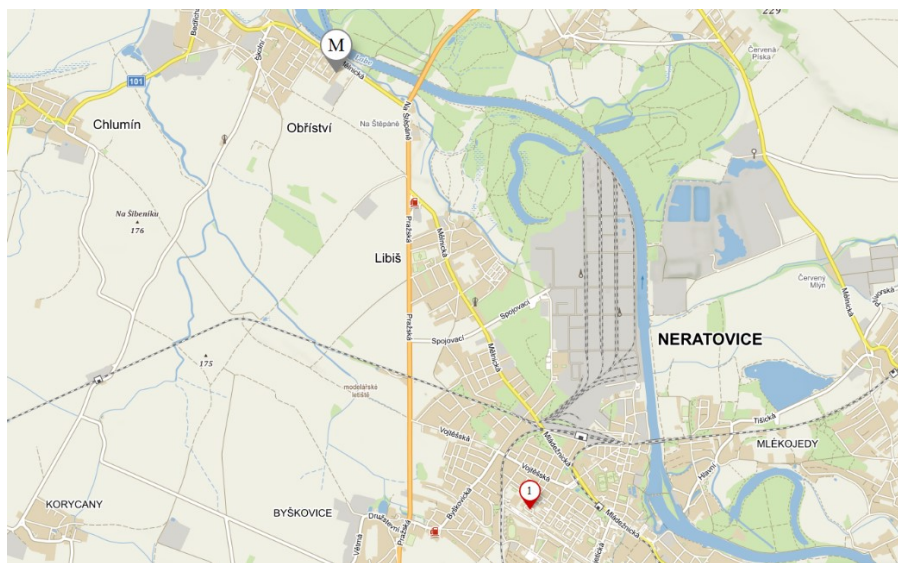
KONCENTRACE CO₂ : 648 ppm

KONCENTRACE TVOC : 132 ppm

ATMOSFÉRICKÝ TLAK : 997,5 hPa

Základnové stanice :

1. Brána B827EBFFFF4DF4FF - Neratovice, ul. Na skalkách (vzdálenost od místa měření cca 4,3 km)
- síla signálu -105 dBm



Obrázek 44 : Zobrazení měřícího místa (M) a základnové stanice na mapě (2. lokalita)

3.3.3 Lokalita – Český Těšín

Město Český Těšín se nachází v Moravskoslezském kraji, v okrese Karviná. Měřicí jednotka byla umístěna na zahradě rodinného domu.

Přijatá zpráva :

```
{ "cmd": "gw", "seqno": 85481194, "EUI": "ABBA01DE71AE09EA", "ts": 1555915811241, "fcnt": 1, "port": 1, "freq": 867300000, "toa": 71, "dr": "SF7 BW125 4/5", "ack": true, "gws": [ { "rssi": -97, "snr": 8.8, "ts": 1555915811241, "time": "2019-04-22T06:50:11.235276Z", "gweui": "647FDAFFFF0069D1", "lat": 49.7464701, "lon": 18.61539970000001 }, { "rssi": -105, "snr": 3.5, "ts": 1555915811340, "time": "2019-04-22T06:50:11.247787Z", "gweui": "B827EBFFFF847E59", "lat": 49.7180548, "lon": 18.5651047 }, { "rssi": -115, "snr": 6.5, "ts": 1555915811251, "time": "2019-04-22T06:50:11.246512Z", "gweui": "647FDAFFFF0069C6", "lat": 49.7331431, "lon": 18.613225599999996 }, { "rssi": -122, "snr": 1, "ts": 1555915811253, "time": "2019-04-22T06:50:11.240567Z", "gweui": "647FDAFFFF0069CA", "lat": 49.7472377, "lon": 18.580555600000002 } ], "bat": 255, "data": "000000bb225901d4007f83a900000000" }
```

Čas měření : 22.04.2019, 8:50:11

Naměřené veličiny:

ALARM – žádný

POHYB – žádný

TEPLOTA : 18,7 °C

VLHKOST : 34 % RH

INTENZITA SVĚTLA : 89 %

KONCENTRACE CO₂ : 468 ppm

KONCENTRACE TVOC : 127 ppm

ATMOSFÉRICKÝ TLAK : 992,4 hPa

Základnové stanice :

1. Brána 647FDAFFFF0069D1 - Č. Těšín, ul. Ostravská (vzdálenost od místa měření cca 0,5 km)
- síla signálu -97 dBm
2. Brána B827EBFFFF847E59 - H. Žukov, ul. Vělopolská (vzdálenost od místa měření cca 4,5 km)
- síla signálu -105 dBm
3. Brána 647FDAFFFF0069C6 - Č. Těšín, ul. Kysucká (vzdálenost od místa měření cca 1 km)
- síla signálu -115 dBm
4. Brána 647FDAFFFF0069CA - Mistřovice, ul. Mistřovická (vzdálenost od místa měření cca 2,6 km)
- síla signálu -122 dBm



Obrázek 45 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnových stanic na mapě (3. lokalita)

3.3.4 Lokalita – Vysoké Mýto

Město Vysoké Mýto se nachází v Pardubickém kraji, v okrese Ústí nad Orlicí. Měřicí jednotka byla umístěna v osobním automobilu zaparkovaném na benzínové pumpě.

Přijátá zpráva :

```
{ "cmd": "gw", "seqno": 85564701, "EUI": "ABBA01DE71AE09EA", "ts": 1555942534630, "fcnt": 1, "port": 1, "freq": 867900000, "toa": 905, "dr": "SF11 BW125 4/5", "ack": false, "gws": [ { "rssi": -119, "snr": -9.8, "ts": 1555942534635, "time": "2019-04-22T14:15:34.628258Z", "gweui": "B827EBFFFF07FBB1", "lat": 49.95088465307478, "lon": 16.155152081381175 }, { "rssi": -121, "snr": -8.5, "ts": 1555942534630, "time": "2019-04-22T14:15:34.597799000Z", "gweui": "024B0BFFFF0308B6", "lat": 49.96670450824322, "lon": 16.17068090348812 } ], "bat": 255, "data": "000000f71f4502d10138843f00000000" }
```

Čas měření : 22.04.2019, 16:15:34

Naměřené veličiny:

ALARM – žádný

POHYB – žádný

TEPLOTA : 24,7 °C

VLHKOST : 31 % RH

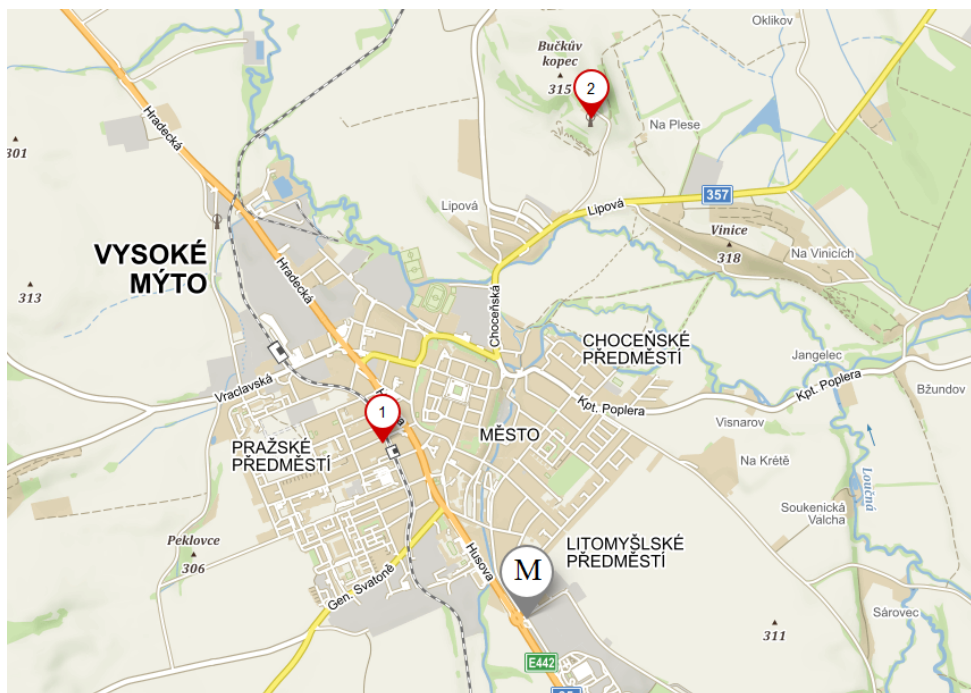
INTENZITA SVĚTLA : 69 %

KONCENTRACE CO₂ : 721 ppm

KONCENTRACE TVOC : 312 ppm
ATMOSFÉRICKÝ TLAK : 993,9 hPa

Základnové stanice :

1. Brána B827EBFFFF07FBB1 - V. Mýto, ul. Rokycanova (vzdálenost od místa měření cca 1,2 km)
- síla signálu -119 dBm
2. Brána 024B0BFFFF0308B6 - V.Mýto, vysílač na Plese (vzdálenost od místa měření cca 2,7 km)
- síla signálu -121 dBm



Obrázek 46 : Zobrazení měřicího místa (M) a základnových stanic na mapě (4. lokalita)

Závěr

Práce shrnuje současný stav v odvětví sítí LPWAN, které jsou jednou ze stěžejních součástí internetu věcí. V úvodní části jsou dále uvedeny měřicí principy a techniky, které je možno využít pro měření environmentálních veličin. Byl proveden základní průzkum trhu, na jehož základě lze konstatovat, že podobné zařízení pro tak komplexní monitorování prostředí s využitím LPWAN není v současné chvíli komerčně dostupné.

Na základě teoretické rešerše, kterou shrnuje úvodní část této práce, a dále na základě stanovených požadavků byla navržena měřicí jednotka. Navržené řešení bylo prakticky realizováno a testováno v reálných podmínkách. Z výsledků testování je patrné, že navržené řešení splňuje hlavní požadavky na takové zařízení. Jedná se zejména o požadovanou přesnost měřených veličin, která je dána specifikacemi použitých senzorů. Měřicí jednotka je založena na 16bitovém mikrokontroleru MSP430F5438A. Komunikační rozhraní do sítě LoRaWAN je realizováno pomocí modulu RN2483 od společnosti Microchip. Pro testování byly nastaveny scénáře podle předpokládaných případů užití. Jednalo se například o nevětraný prostor, který byl po delší čas obýván několika osobami. Dle předpokladu došlo ke zvýšení koncentrace CO₂. V případě, že by jednotka byla součástí komplexnějšího systému pro domácí automatizaci, mohla by být například spuštěna ventilace. Další scénář byl naplněn při kontrolním měření v bezprostřední blízkosti čerpací stanice pohonných hmot. Zde byla naměřena zvýšená koncentrace těkavých látek v ovzduší. Dále byly testováním získány praktické odpovědi na otázky týkající se pokrytí území ČR signálem LoRaWAN a dosahu jednotlivých základnových stanic. Například s všesměrovou prutovou anténou o zisku 6 dB bylo možné komunikovat se základnovou stanicí na vzdálenost 14 km. V případě použití antény o zisku 9 dB byla tato vzdálenost až 62 km. V tomto případě se jednalo o spojení měřicí jednotky z lokality Praha 9 a základnové stanice na vrchu Monínec v Jižních Čechách.

V další iteraci vývojového cyklu by bylo vhodné provést v obvodovém řešení a programovém vybavení měřicí jednotky několik změn. Jednak by bylo vhodné přenášet informaci o stavu akumulátoru, který napájí měřicí jednotku. S přenosem této informace bylo počítáno již při návrhu komunikačního protokolu LoRa a jeho specifikaci. Informace by se tedy pouze doplnila do přenášených režijních dat. Další možností by bylo tuto informaci vložit do aplikačních dat v přenášeném datovém rámci. Dále by bylo vhodné doplnit jednotku o indikační LED diody, které by uživatele informovaly o aktuálním stavu zařízení. Poslední součástí systému pro praktickou využitelnost zařízení by byla uživatelská aplikace, která by ukládala naměřená data a vhodně je graficky interpretovala.

Zadání diplomové práce bylo splněno, navržené řešení je plně funkční a splňuje požadavky, které byly stanoveny řešitelem na začátku vývojového cyklu. Nedílnou součástí práce jsou zdrojové kódy programového vybavení pro mikrokontroler implementované v jazyce C, dále schéma obvodového řešení a podklady pro výrobu DPS navržené v systému Altium.

Literatura

- [1] LOM, Michal a PŘIBYL, Ondřej. Síť pro internet věcí v České republice. *tzbinfo.cz* [online]. 6.11.2017 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/informacni-a-telekomunikacni-technologie/16519-site-pro-internet-veci-v-ceske-republice>
- [2] LoRaWAN What is it ? [online]. 04.2018 [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://loralliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [3] LoRa Alliance: About LoRa Alliance [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://loralliance.org/about-lora-alliance>
- [4] České Radiokomunikace: Služby IoT [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://www.cra.cz/sluzby-iot>
- [5] Pripoj.me: Technologické aspekty technologie LoRa [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://pripoj.me/technicke-aspekty-technologie-lora/>
- [6] LoRa Alliance: About LoRaWAN [online]. [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: <https://loralliance.org/about-lorawan>
- [7] Simple Cell: FAQ [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://simplecell.eu/faq/>
- [8] Sigfox: Technical Overview [online]. [cit. 2019-02-13]. Dostupné z: <https://simplecell.eu/wp-content/uploads/2018/05/ALL-ABOUT-SIGFOX-EN-01-18.pdf>
- [9] Ericsson: NB-IoT [online]. 2016 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.ericsson.com/en/ericsson-technology-review/archive/2016/nb-iot-a-sustainable-technology-for-connecting-billions-of-devices>
- [10] Vodafone: Co je NB-IoT [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.vodafone.cz/internet-veci/>
- [11] IoT-portal: Mapa pokrytí [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.iot-portal.cz/mapa-pokryti/>
- [12] RF Page: Specification and Application of NB-IoT [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.rfpage.com/specifications-and-applications-of-narrow-band-iot/>
- [13] VOJÁČEK, Antonín. Přehled principů el. měření teploty: 1.díl. *Automatizace.hw.cz* [online]. 24.06.2014 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [14] MAREŠ, Luděk. Vlhkost vzduchu a její měření. *Tzbinfo.cz* [online]. 13.03.2006 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/teorie-a-vypocty-vetrani-klimatizace/3137-vlhkost-vzduchu-a-jeji-mereni>
- [15] Vyvoj.hw.cz: Vlhkoměry [online]. 2004 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <https://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/vlhkomery.html-0>

- [16] BEJČEK, Ludvík a Jan VACULÍK. *Automa.cz: Snímače tlaku* [online]. 2011 [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: http://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/42719.pdf
- [17] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Vlhkost vzduchu* [online]. c2019 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vlhkost_vzduchu&oldid=17116343
- [18] VAFEK, Zdeněk. Možnosti měření oxidu uhličitého - měřicí přístroje a čidla. *Tzbinfo.cz* [online]. 14.3.2006 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/13910-moznosti-mereni-oxidu-uhliciteho-merici-pristroje-a-cidla>
- [19] *PROTRONIX: Měřit CO2 často nestačí* [online]. [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.careforair.eu/merit-co2-casto-nestaci/>
- [20] PRIBÁŇOVÁ, Henrietta a Arijana LAJČÍKOVÁ. Umělé osvětlení vnitřního prostředí. *Tzbinfo.cz* [online]. 03.01.2003 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://elektro.tzb-info.cz/osvetleni/1303-umele-osvetleni-vnitriho-prostredi>
- [21] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotorezistor* [online]. c2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotorezistor&oldid=16747567>
- [22] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fotodioda* [online]. c2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fotodioda&oldid=15963633>
- [23] *Wikipedie: Otevřená encyklopedie: Fototranzistor* [online]. c2018 [cit. 2019-02-27]. Dostupný z: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Fototranzistor&oldid=15835493>
- [24] *Texas Instruments: MSP430F543xA* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f5438a.pdf>
- [25] *Sensirion: SHT21* [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/0_Datasheets/Humidity/Sensirion_Humidity_Sensors_SHT21_Datasheet.pdf
- [26] *BOSCH: BMP280* [online]. [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: https://ae-bst.resource.bosch.com/media/_tech/media/datasheets/BST-BMP280-DS001.pdf
- [27] *Pokusy.chytrak.cz: Výškoměr* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://www.pokusy.chytrak.cz/schemata/vyskac.htm>
- [28] *AMS: iAQ-core* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: https://ams.com/documents/20143/36005/iAQ-core_DS000334_1-00.pdf/123c67cc-92d4-9a5c-d7ca-24f1d439c6a4
- [29] *Mikroelektronika: Air Quality 2 click* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <https://www.mikroe.com/air-quality-2-click>
- [30] *ROHM semiconductors: BH1603* [online]. [cit. 2019-03-02]. Dostupné z: <http://rohms.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/light/bh1603fvc-e.pdf>
- [31] *Analog Devices: ADXL363* [online]. [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL363.pdf>

[32] *Microchip: RN2483* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z:
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-Data-Sheet-DS50002346D.pdf>

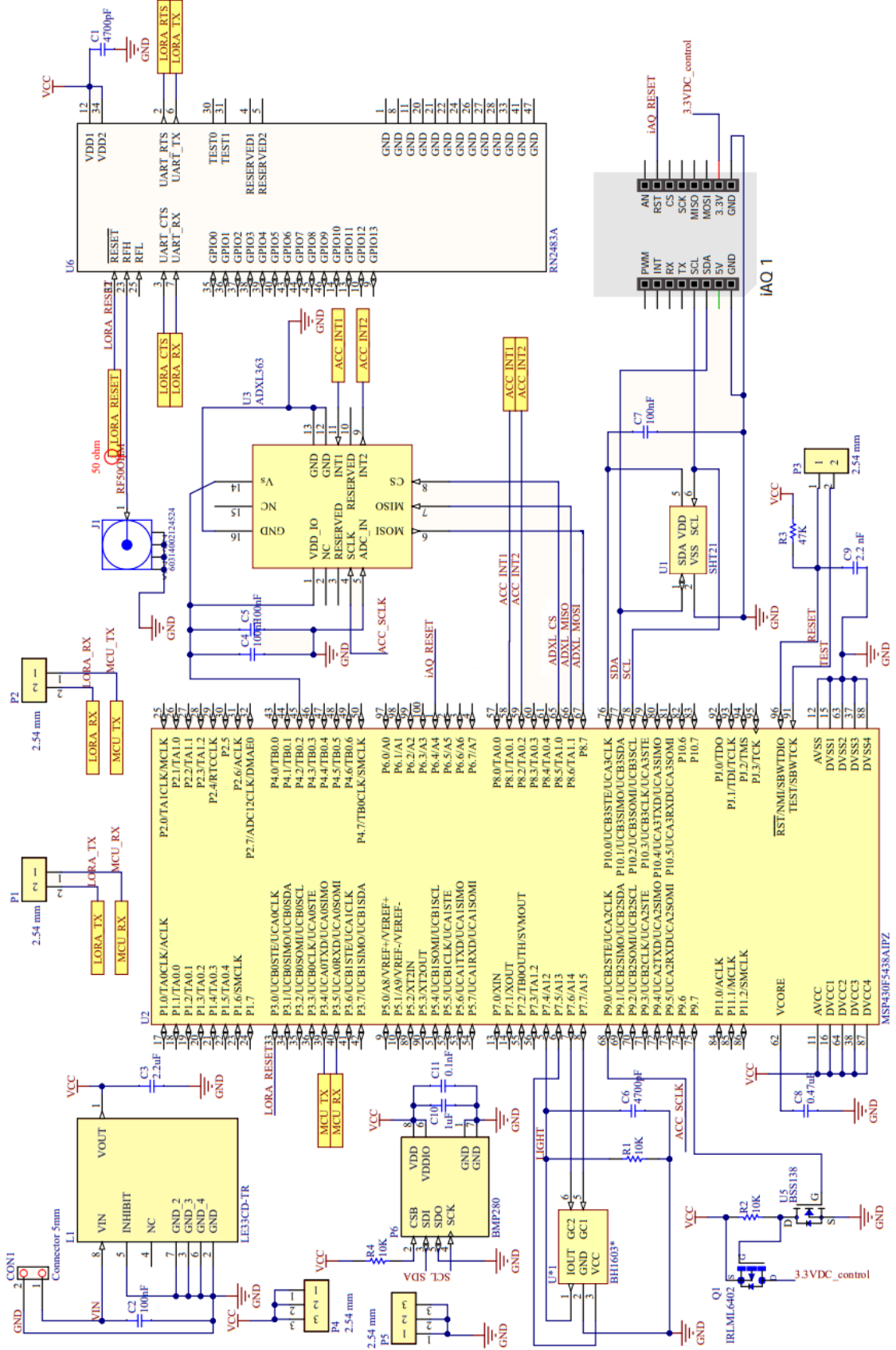
[33] *ST: LEXX* [online]. [cit. 2019-03-07]. Dostupné z:
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00000545.pdf>

Přílohy

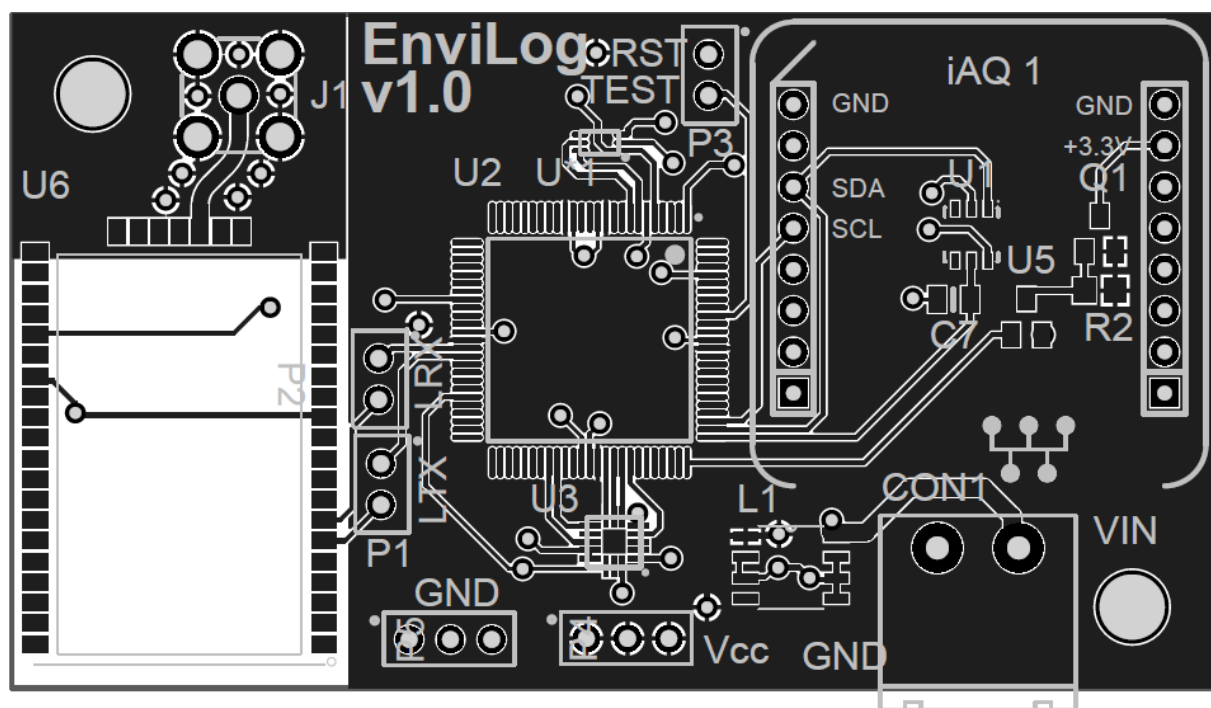
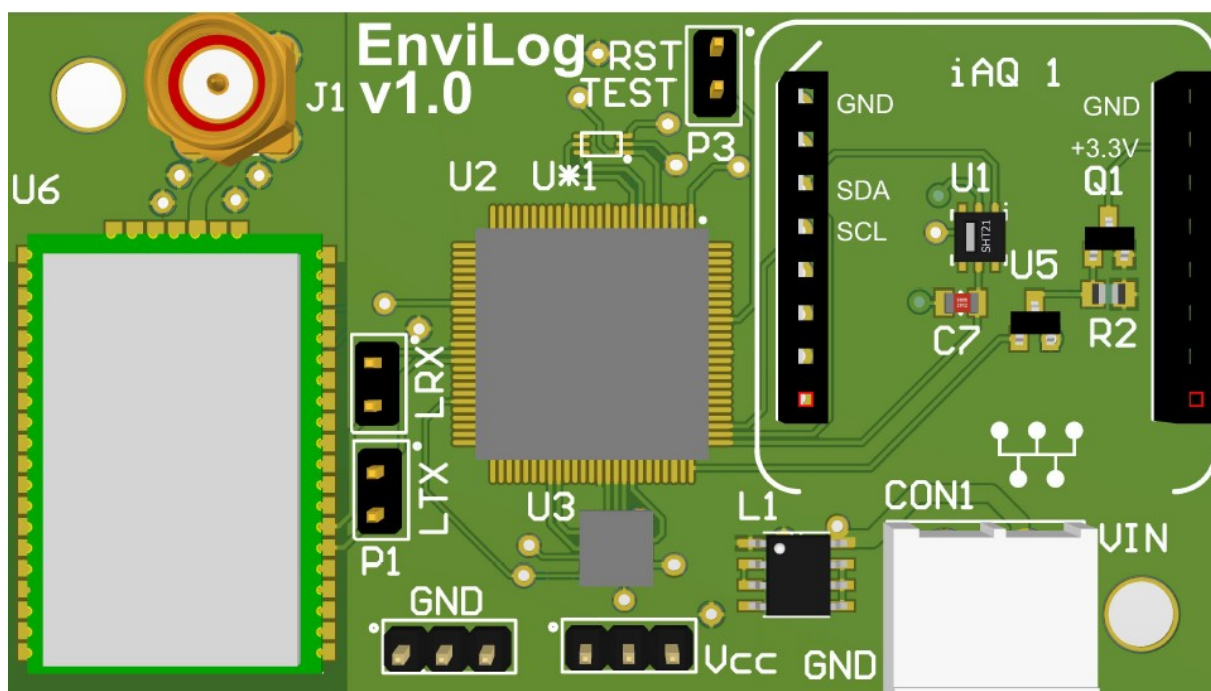
Seznam příloh :

Příloha I.	:	Celkové schéma zapojení	str. 65
Příloha II.	:	DPS strana TOP	str. 66
Příloha III.	:	DPS strana BOTTOM	str. 67
Příloha IV.	:	Zdrojový kód	příloha v IS EDISON
Příloha V.	:	Data pro výrobu DPS	příloha v IS EDISON

Příloha I.



Příloha II.



Příloha III.

